

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Arquitetura Robótica - Desenvolvimento de um “Cable Robot” para Construção

Mário Miguel Martins

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Professor Pedro Gomes da Costa
Co-orientador: Professor José Magalhães Lima

27 de Julho de 2014

© Mário Miguel Martins, 2014

Resumo

Com o aumento da população mundial, cresce a necessidade de construir infraestruturas que respondam às exigências. A construção envolve o manuseamento de grandes cargas, razão pela qual as ferramentas mais usadas são as guias. Com foco no reposicionamento de elevada amplitude de objetos com grandes dimensões surgiram os robôs de cabos. *Contour Crafting* é uma tecnologia relativamente recente de fabrico em camadas que permite a construção automática de estruturas. O conceito baseia-se num robô de grandes dimensões, capaz de suportar cargas de elevada massa e está habilitado a fazer chegar a sua ferramenta a um volume de trabalho significativo.

O sistema proposto consiste num robô cujas partes móveis são, somente, uma plataforma e um conjunto de quatro cabos. O deslocamento da plataforma é provocado pelas tensões aplicadas aos cabos. Uma grande gama de ferramentas podem ser aplicadas ao ponto móvel do robô, neste caso é usado uma garra capaz de realizar a tarefa de *pick-and-place*. Este sistema é totalmente automatizado e tem como principal objetivo a montagem de estruturas de forma rápida e precisa. Com este tipo de robôs surgem atributos apelativos quando comparados com sistemas mais comuns como: melhor portabilidade, menor custo e a possibilidade de construir estruturas maiores.

Esta dissertação apresenta todo o processo de desenvolvimento de um robô de quatro cabos, desde a análise da cinemática até à implementação do sistema de controlo.

Abstract

With the increase of the world population, grows the need to build infrastructures that respond the demands of modern society. The construction involves the handling of large loads, reason why the tools used more often are cranes. Focusing on repositioning large objects in big distances, arise the cable-robot. Contour Crafting is a relatively new layered fabrication technology that enables automated construction of whole structures. The concept is based on a robot with long legs, capable of supporting loads with large mass. The robot has the capacity of reach any point in a considerable large work space.

The system proposed consists in a robot whose moving parts are only a platform and a set of four cables. The movement of the mobile platform is caused by the forces applied to the wires. It may be installed a great amount of tools to the moving point of the robot, on this case it is used a mechanic hand capable of perform the task pick-and-place. This system is entirely automated and has the main goal of assembly structures quickly and precisely. With this kind of robots arise compelling attributes when compared to the more common systems such as: better portability, lower cost and the ability to build larger structures.

This dissertation presents the whole process of developing a robot with four cables from the analysis of the kinematics to the implementation of the control system.

Agradecimentos

As minhas primeiras palavras de agradecimento têm de ir, forçosamente, para os meus Pais. À minha Mãe pelo apoio que sempre me deu e ao meu Pai por me apresentar o mundo da Engenharia. Um forte abraço para o Gino que está sempre disposto a ajudar.

Gostaria de atribuir um agradecimento especial aos meus orientadores, Professor Pedro Gomes da Costa e Professor José Magalhães Lima, pela sua orientação e apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Pela disponibilidade e esclarecimentos, pelas críticas e sugestões dadas sempre no intuito de melhorar este trabalho.

Não posso deixar de agradecer aos meus amigos, sem eles este percurso teria sido insuportável, certamente.

P.S. obrigado pela inspiração.

“Learning never exhausts the mind.”

Leonardo da Vinci

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Contexto e Motivação	1
1.2 - Objetivos	2
1.3 - Estrutura do documento	2
Capítulo 2	5
Estado da Arte.....	5
2.1 - IPAnema: A family of Cable-Driven Parallel Robots for Industrial Applications	5
2.2 - ReelAx: A Reconfigurable Robot for Cable-Driven Parallel Robotic Research and Industrial Scenario Proofing.....	8
2.3 - The NIST RoboCrane.....	11
2.4 - Segesta: The Robot's Net.....	14
2.5 - A Low-Cost Easy Operation 4-Cable Driven Parallel Manipulator, LARM	16
Capítulo 3	19
Arquitetura.....	19
3.1 - Estrutura	19
3.2 - Subsistemas	23
3.3 - <i>Hardware</i>	26
Capítulo 4	31
Modelo do Sistema	31
4.1 - Cinemática	31
4.2 - Estudo <i>Roll</i> e <i>Pitch</i>	42
4.3 - Volume de Trabalho	62
Capítulo 5	67
Implementação.....	67
5.1 - Trajetória e planeamento	67
5.2 - Controle	70
5.3 - Interface.....	73
Capítulo 6	77

Resultados	77
6.1 - Erro.....	77
6.2 - Repetibilidade.....	81
6.3 - <i>Pick-and-Place</i>	84
Capítulo 7	89
Conclusões	89
Referências	91
Anexo A.....	95
Anexo B.....	101

Lista de Figuras

Figura 2.1 - IPAnema 1 e IPAnema 2 [6]	6
Figura 2.2 - Estrutura do sistema do robô IPAnema [9]	7
Figura 2.3 - Estrutura de Interfaces do IPAnema [9]	8
Figura 2.4 - ReelAx [12]	9
Figura 2.5 - ReelAx8 [12]	10
Figura 2.6 - Conceito de estabilização do RoboCrane aplicado a vários tipos de grua [15]	11
Figura 2.7 - Estrutura do RoboCrane [15]	12
Figura 2.8 - Aplicação RoboCrane [15]	12
Figura 2.9 - Arquitetura do sistema de controlo do Robocrane	13
Figura 2.10 - Segesta [22]	14
Figura 2.11 - Arquitetura de controlo do Segesta [27]	16
Figura 2.12 - Protótipo do robô de cabos do LARM [29]	16
Figura 2.13 - Versão no plano do robô de cabos do LARM [29]	17
Figura 2.14 - Arquitetura do sistema do robô de cabos LARM [33].....	18
Figura 3.1 - Modelo 3D do robô.....	20
Figura 3.2 - Modelo 3D da Ferramenta.....	20
Figura 3.3 - <i>Cardan</i> / articulação universal [36].	21
Figura 3.4 - Modelo 3D do sistema - vista SO	21
Figura 3.5 - Modelo 3D do sistema - vista SE.....	22
Figura 3.6 - Modelo 3D do sistema - vista NO	22
Figura 3.7 - Modelo 3D do sistema - vista NE	23
Figura 3.8 - Representação das interações do sistema.....	25
Figura 3.9 - Estrutura metálica, roldanas e cabos	27
Figura 3.10 - Plataforma e Ferramenta	28
Figura 3.11 - Guincho de um cabo	29
Figura 3.12 - Arduino Uno R3	29

Figura 3.13 - Sistema real completo	30
Figura 4.1 - Modelo simplificado	32
Figura 4.2 - Modelo simplificado com plataforma	33
Figura 4.3 - Modelo simplificado 3D com plataforma	35
Figura 4.4 - <i>Yaw, Pitch e Roll</i> no referencial Cartesiano	36
Figura 4.5 - <i>Yaw</i> na plataforma	36
Figura 4.6 - <i>Yaw</i> na ferramenta	37
Figura 4.7 - <i>Pitch</i> na plataforma	37
Figura 4.8 - <i>Roll</i> na plataforma	38
Figura 4.9 - Ordem das rotações <i>Roll e Pitch</i>	38
Figura 4.10 - 1ª Rotação, <i>Roll</i> - plano <i>XY</i>	39
Figura 4.11 - 1ª Rotação, <i>Roll</i> - plano <i>YZ</i>	40
Figura 4.12 - 2ª Rotação, <i>Pitch</i> - plano <i>YZ</i>	41
Figura 4.13 - Grau de liberdade <i>Roll</i> - plano <i>XZ</i>	43
Figura 4.14 - Ferramenta <i>laser</i>	44
Figura 4.15 - IMU.....	45
Figura 4.16 - <i>Encoder</i> / Arduino	45
Figura 4.17 - I Estudo - Parte I	46
Figura 4.18 - Gráficos I Estudo - Parte I	49
Figura 4.19 - I Estudo - Parte II.....	52
Figura 4.20 - Representação II Estudo - Parte I	54
Figura 4.21 - Gráfico II Estudo - Parte I - <i>Roll</i>	55
Figura 4.22 - Gráfico II Estudo - Parte I - <i>Pitch</i>	55
Figura 4.23 - Gráfico II Estudo - Parte II.....	56
Figura 4.24 - Gráfico II Estudo - Parte III	57
Figura 4.25 - Representação do método usado para determinação do volume de trabalho ...	63
Figura 4.26 - Volume de trabalho 3D.....	65
Figura 4.27 - Volume de trabalho <i>XY</i>	65
Figura 4.28 - Volume de Trabalho <i>XZ</i>	66
Figura 4.29 - Volume de trabalho <i>YZ</i>	66

Figura 5.1 - Representação 3D da trajetória.....	68
Figura 5.2 - Máquina de estados	70
Figura 5.3 - Diagrama Controlador PD	72
Figura 5.4 - Posição de reiniciação do sistema	73
Figura 5.5 - <i>Reset</i>	74
Figura 5.6 - Ficheiro de texto com cinco ordens	75
Figura 5.7 - Interface	75
Figura 6.1 - Volume de trabalho simplificado	80
Figura 6.2 - Gráfico do erro de repetibilidade	83
Figura 6.3 - Sequência Imagens ilustrativas de um processo pick-and-place	87

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Dados I Estudo - Parte I	47
Tabela 4.2 - Dados I Estudo - Parte II	50
Tabela 4.3 - Dados II Estudo - Parte I	54
Tabela 4.4 - Dados II Estudo - Parte II	56
Tabela 4.5 - Dados II Estudo - Parte III.....	57
Tabela 4.6 - Valores limites do volume de trabalho.....	64
Tabela 5.1 - Novo trabalho / Ordem de Trabalhos	69
Tabela 6.1 - Medições Erro.....	78
Tabela 6.2 - Erro Absoluto	79
Tabela 6.3 - Pontos usados no teste de Repetibilidade	81
Tabela 6.4 - Medições do teste Repetibilidade.....	82

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

3D	Tridimensional
A/D	<i>Analog/Digital</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
D/A	<i>Digital/Analog</i>
E/S	Entrada/Saída
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
ID	<i>Identification</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PD	Proporcional Derivador
PID	Proporcional IntegradorDerivador
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
UART	<i>Universal asynchronous receiver/transmitter</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Contexto e Motivação

Contour crafting é uma tecnologia de fabrico em camadas que foi proposto por Khoshnevis [1, 2] para construção automatizada de estruturas civis. O objetivo desta tecnologia é obter melhores resultados em relação à velocidade, segurança, qualidade e custo na construção civil. Semelhante a outras tecnologias de fabrico por camadas, este sistema permite a construção de estruturas de baixo para cima, uma camada de cada vez, ou seja, concede a sobreposição de objetos ou qualquer outro material sobre áreas dentro do seu volume de trabalho. Ao contrário da maioria das tecnologias, sistemas deste tipo são projetados para a construção de estruturas de qualquer escala, sendo mais proveitoso e indicado de grande escala. Os projetos a realizar podem ser desde casas unifamiliares até complexos habitacionais e edifícios de escritórios.

Esta tecnologia usa o conceito de robô de cabos. Os robôs de cabos fazem parte de uma classe especial de robôs paralelos em que os braços rígidos são substituídos por fios. A mecânica do sistema produz menos probabilidade de colisão com objetos que se encontrem no volume de trabalho, isto é, braços menos intrusivos. A sua simples mecânica e arquitetura escalar acrescentam o potencial de se obter volumes de trabalho consideravelmente superiores às demais tecnologias. Um aspeto igualmente importante é a baixa quantidade de energia que despende para suportar grandes cargas, quando comparado com manipuladores clássicos. Estes sistemas robóticos têm a capacidade de deslocar a sua plataforma suspensa apenas com o movimento de cabos. A maneira mais simples de o fazer, é enrolar os cabos com guinchos.

No caso específico desta dissertação são usados quadro cabos. A única ligação de todos os cabos é uma plataforma que se encontra dentro de uma estrutura. Isto deve-se ao facto de os cabos serem puxados a partir de um ponto mais alto (extremos da estrutura) em relação ao centro de massa da plataforma. A única força descendente que se apresenta na plataforma,

em todos os momentos, é a força gravitacional. É necessário ter-se em conta uma relevante propriedade mecânica dos cabos que é a sua flexibilidade, ou seja, os cabos só têm a capacidade de puxar e não empurrar.

A grande gama de ferramentas que podem ser aplicadas à plataforma e os seis graus de liberdade (posição Cartesiana e orientação da ferramenta) concede ao robô de cabos tratado nesta dissertação uma versatilidade, precisão, força e amplitude indicados para os requisitos do sistema.

Este trabalho é financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto PTDC/ATP-AQI/5124/2012.

1.2 - Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema robótico “cable robot”, que efetue construções (paredes, painéis, etc.) baseadas num desenho tridimensional em CAD.

Atualmente existem vários trabalhos de investigação no desenvolvimento de robôs controlados por cabos. Este robô é constituído por uma plataforma (onde se encontra a ferramenta) que é ligada por vários cabos (controlados por motores) que comandam a posição desta tridimensionalmente (com vários graus de liberdade).

Este sistema tem a vantagem de ter menor inércia do que um manipulador clássico, um volume de trabalho muito maior e um custo muito mais baixo.

Este trabalho consiste em desenhar, projetar e desenvolver um robô, apoiado em várias linhas que, devidamente controladas, colocam a ferramenta na posição desejada, possibilitando a execução de tarefas tais como *pick-and-place* de objetos.

1.3 - Estrutura do documento

Este documento está dividido em 7 capítulos.

No Capítulo 2 intitulado de “Estado da arte” são apresentadas soluções estudadas como protótipos do universo científico e produtos finais existentes no mercado. Os exemplos aqui existentes têm todos pontos em comum com o tema da dissertação.

No Capítulo 3 é apresentada a estrutura do sistema, interação dos subsistemas e componentes mecânicos, com o objetivo de uma melhor perceção do projeto realizado.

O Capítulo 4 aborda o sistema por uma vertente mais teórica, o estudo da cinemática. É uma das componentes mais importantes, pois todo o resto se baseia no conhecimento exato da geometria do robô. O volume de trabalho também é apresentado nesta secção.

O Capítulo 5 expõe a implementação na prática dos estudos realizados no “Modelo do Sistema” e é explicado todo o processo de controlo do sistema e a interface com o utilizador.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados do trabalho realizado. É analisado o comportamento do sistema em relação ao erro pontual e erro de repetibilidade.

Por fim são descritas as ilações que foram retiradas do projeto. As “Conclusões” são uma parte importante para fazer uma retrospeção do que foi realizado. Com o término do projeto é possível apontar alguns trabalhos futuros pertinentes para o melhoramento do produto.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo são abordados vários protótipos ou produtos que usam a tecnologia dos robôs de cabos. Os exemplos apresentados apesar de conterem arquiteturas semelhantes abordam os requisitos do sistema através de diferentes prismas. A gama de soluções concedida por estes projetos permite fazer um ponto de ligação ao objeto de estudo desta dissertação.

2.1 - IPAnema: A family of Cable-Driven Parallel Robots for Industrial Applications

Desde 2006 o grupo Fraunhofer IPA tem vindo a desenvolver a família de robôs denominada IPAnema. Estes robôs têm requisitos de média e grande escala para inspeção, manuseamento e montagem [3,4]. Um grande objetivo da empresa é a produção de um robô baseado em componentes de qualidade industrial. Por um lado, esta abordagem fornece alta robustez e fiabilidade ao sistema, mas por outro com estes componentes poderão advir limitações no desenvolvimento de algoritmos de controlo pois métodos numéricos de alto nível são difíceis de integrar na maior parte dos sistemas de tempo real devido à elevada quantidade de informação a processar em tempo real. Como consequência levaria tempo a refazer algoritmos que são facilmente desenvolvidos em ferramentas como Matlab/Simulink. Estas ferramentas dificilmente são implementadas em controladores de robôs e PLC. Portanto foi assumido um compromisso entre complexidade numérica e robustez, fiabilidade e simplicidade nos componentes de controlo [5]. A Figura 2.1 ilustra dois protótipos desenvolvidos, o IPAnema1 e IPAnema2.



Figura 2.1 - IPAnema 1 e IPAnema 2 [6]

Caraterísticas

O volume de trabalho e geometria dos robôs de cabos, neste caso, são acoplados de maneira pouco intuitiva. Por isso a abordagem na construção da estrutura do robô de cabos tem de ser baseada em propriedades pré-descritas. Um dos critérios mais importantes é o controlo do volume de trabalho, isto é, a capacidade do robô criar forças positivas nos cabos. Existe a necessidade de saber os limites do volume de trabalho, ou seja, o espaço viável, para isso é feita uma análise da distribuição de forças pela ferramenta WireCenter [6, 7]. A geometria do robô é verificada com a interferência dos cabos seguindo a abordagem geométrica [8]. O *design* com cabos na base (a puxar a ferramenta desde baixo) permite forças descendentes (em vez de depender somente da gravidade quando se pretende deslocar a ferramenta para baixo).

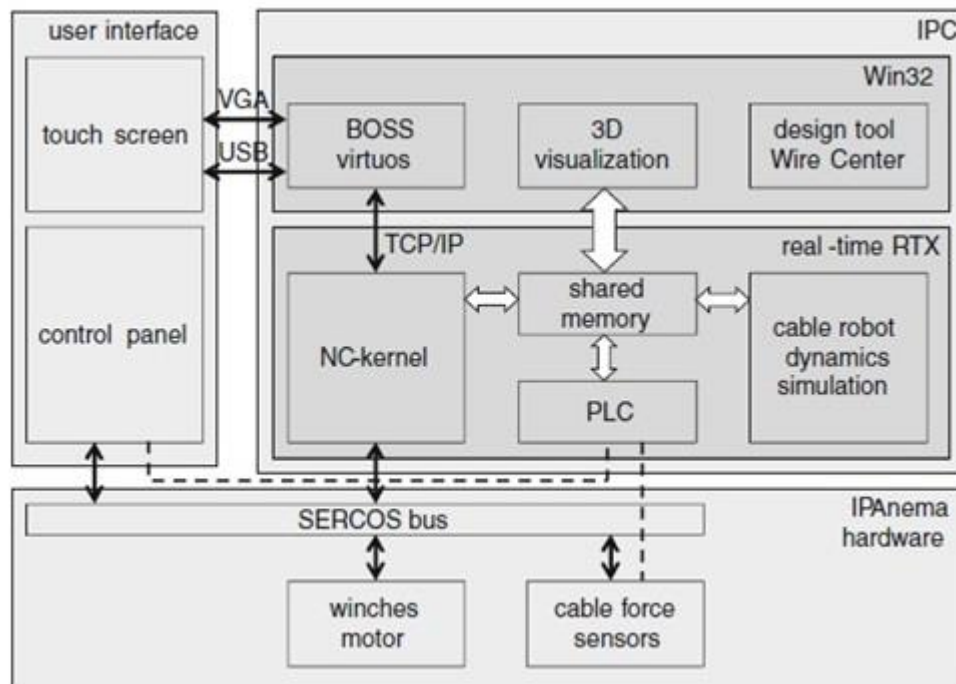


Figura 2.2 - Estrutura do sistema do robô IPAnema [9]

O sistema de controlo do robô consiste na monitorização constante da posição da ferramenta. Para isso são usados algoritmos que estão integrados nos módulos dos eixos de cada guincho. A execução de comandos de movimento é produzido por servo-controladores (Bosh-Rexroth). Os comandos são enviados através do SERCOS do NC-kernel. A posição em cascata e em malha fechada, e o controlo em tempo real de cada servo motor pode ser controlado individualmente com o correspondente servo-controlador.

O NC-kernel é executado em tempo-real numa extensão RTX do sistema operativo Windows XP. O programa é escrito em Código G e são geradas trajetórias em coordenadas espaciais (de acordo com Código G). O movimento (da ferramenta) desejado é produzido pela alteração dos comprimentos dos cabos definindo valores para os servo motores (executando uma transformação cinemática) [9]. O comprimento dos cabos é medido através da leitura dos *encoders* dos guinchos, para que seja estimada a posição atual da ferramenta. A Figura 2.2 representa um diagrama da estrutura do sistema de controlo.

Para a interface com o equipamento industrial *standard* é acoplado um controlador (CoDeSys PLC da 3S-Smart Software Solutions) ao NC-kernel através de memória partilhada. São ainda usados sensores de força para a leitura das forças nos cabos, e essa informação é processada no PLC (*Programmable Logic Controller*). Além disso, o PLC permite a interface

com uma infraestrutura-TI adicional [9, 10]. A Figura 2.3 ilustra um diagrama da interação das interfaces.

A interface com o utilizador (GUI) é feita através de um ecrã tátil e de um painel de controlo

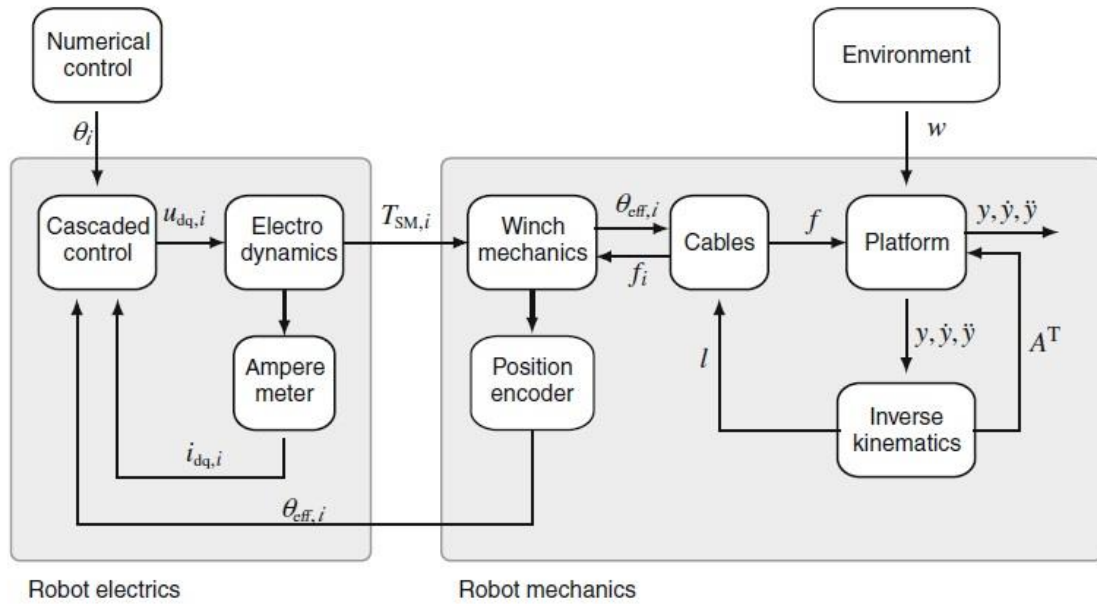


Figura 2.3 - Estrutura de Interfaces do IPanema [9]

2.2 - ReelAx: A Reconfigurable Robot for Cable-Driven Parallel Robotic Research and Industrial Scenario Proofing

Cada aplicação contém requisitos próprios que levam a configurações diferentes de robôs. O LIRMILÍMETROS e Tecnalia consideraram os avanços nas investigações académicas e a procura por novos conceitos técnicos como leis de controlo específicas e modelos de cabos, e a necessidade de potenciais utilizadores de robôs de cabos, para produzir um protótipo viável para diferentes casos [10]. O objetivo é então testar diferentes cenários e diferentes configurações de robôs: operações em espaços diferentes (i.e., bidimensional, tridimensional, com diferentes graus de liberdade), várias configurações de plataformas (base, espacial, único ponto), diferentes configurações de cabos (configuração tipo grua, "fully constrained design") [11]. A Figura 2.4 demonstra uma aplicação do robô Reelax.

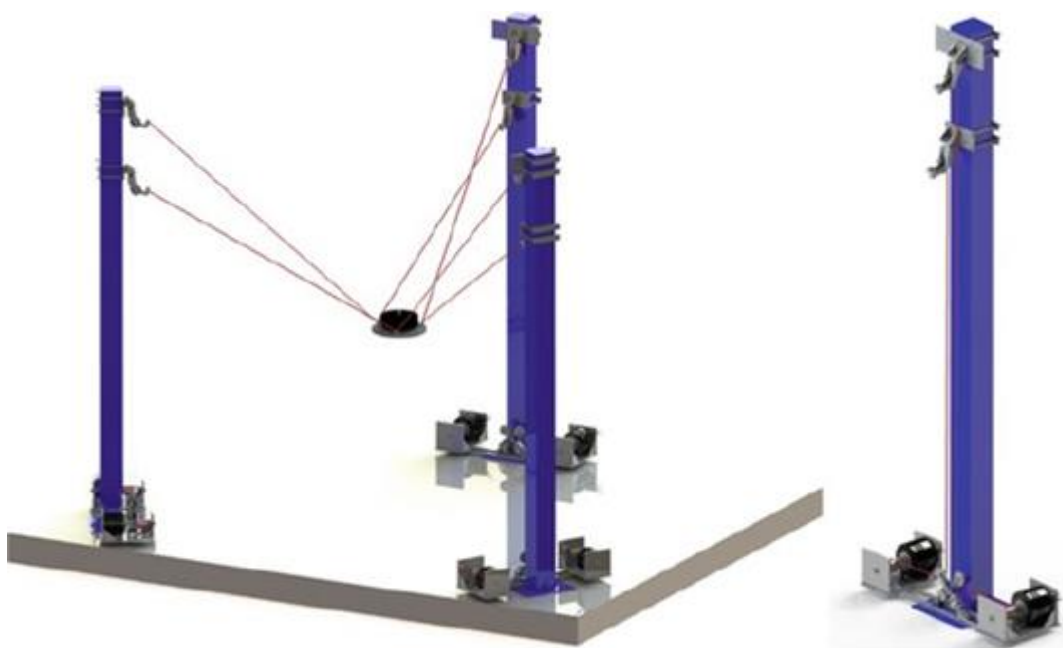


Figura 2.4 - ReelAx [12]

Caraterísticas

As especificações geométricas são baseadas nas posições dos pontos de saída dos cabos (roldanas). Os cabos deslizam, controladamente, desde a base (onde se encontram os guichos), passando pelas roldanas até aos pontos de fixação com a plataforma móvel. O primeiro requisito geométrico do ReelAx é a reconfiguração. É suposto ser possível a fácil modificação dos pontos de saída e dos pontos de fixação, e também das ligações dos cabos entre eles. Os diferentes elementos do robô de cabos deverão ser facilmente transportados. O número máximo de cabos é 8 [12].

O volume de trabalho máximo do robô é limitado pelo comprimento de cada cabo. Este comprimento está definido em 6,6 metros para ser capaz de percorrer a diagonal de 4 metros entre dois vértices do cubo, não deixando de apresentar um volume de trabalho maior que a maioria dos robôs clássicos. A plataforma móvel poderá ter uma carga máxima de 25 quilogramas. Os cabos devem suportar o peso total da plataforma com alguma margem, que corresponde a uma tensão máxima de 300 Newton. A velocidade típica que a plataforma atinge é de 1,5 metros por segundo.

Entre o guincho e o ponto de saída existe um sensor de força para que as tensões nos cabos possam ser medidas [13]. A Figura 2.5 mostra modelos 3D do ReelAx8.

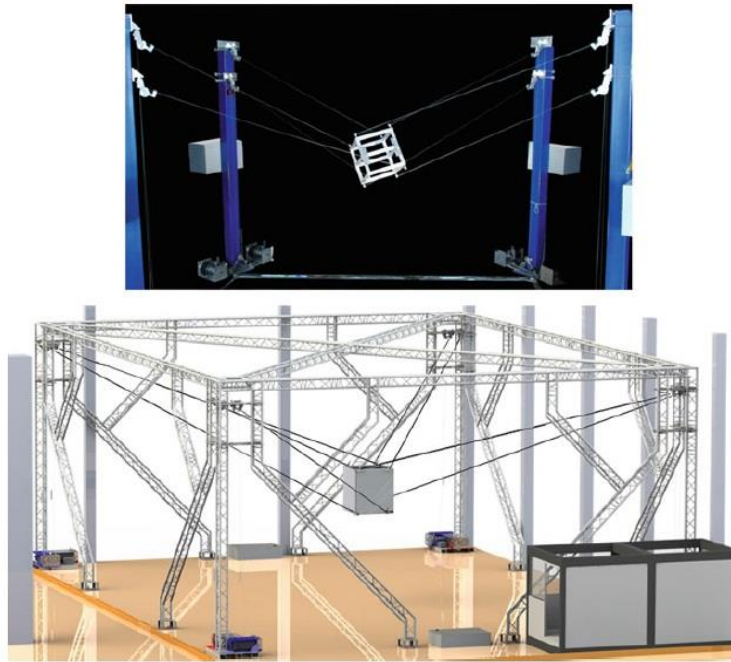


Figura 2.5 - ReelAx8 [12]

Controlo

Este robô de cabos usa um controlador MathWorks xPC Target. São, portanto, seguidas leis e definições de MATLAB e Simulink. O controlador é ligado com os postos de trabalho através de Ethernet em tempo-real, baseado no protocolo EtherCAT. O uso deste protocolo permite que os postos possam estar até 100 metros uns dos outros. Cada posto está equipado com um AccurET da ETEL Motion Technology que permite o controlo de dois guinchos do posto de trabalho. Estes últimos são atuados diretamente por servo motores. Cada unidade de acionamento recolhe informação dos sensores de força para posterior envio ao controlador. Entre postos existe um cabo elétrico de alimentação e um sistema de paragem de emergência [14].

Durante a fase inicialização, as tensões nos cabos são alteradas para níveis definidos pelo utilizador usando um ciclo de controlo de forças básico nos guinchos. O controlador comanda para uma posição ou para um controlo híbrido força/posição em ciclo "*feedback*", uma vez que os comprimentos dos cabos são inicializados. As tensões nos cabos devem ter valor suficientemente alto para que os cabos se mantenham esticados. A inicialização é simplificada se forem usados *encoders* de multivoltas absolutas. O ReelAx usa *encoders* incrementais [12].

2.3 - The NIST RoboCrane

O Robocrane surgiu no início dos anos 1980 no NIST (*Nacional Institute os Standards and Technology*). Consistiu num novo *design* baseado no conceito de grua. O produto final pode ser escalado para várias utilizações, de acordo com os objetivos do programa DARPA (*Defense Advance Research Projects Agency*), patrocinador do projeto [15]. Os testes iniciais dos primeiros protótipos mostraram que o Robocrane poderia ser utilizado em operações típicas de guias, especialmente na indústria de construção civil. A Figura 2.6 apresenta imagens como demonstração do conceito de estabilização aplicado a vários tipos de guias.

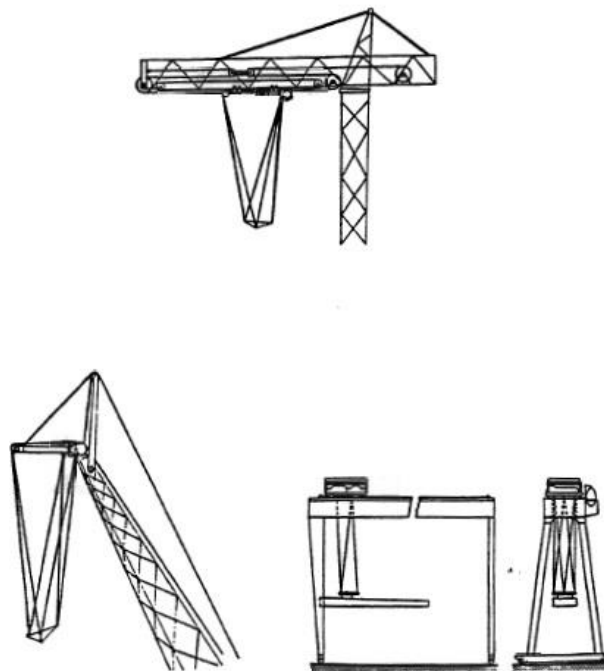


Figura 2.6 - Conceito de estabilização do RoboCrane aplicado a vários tipos de grua [15]

Em resposta aos fogos, que constantemente deflagravam no Kuwait durante a Guerra do Golfo Pérsico, o Robocrane foi adaptado para assistir o combate dos fogos durante a extração de poços de petróleo [16]. Em 1991, o NOWFFR (*NIST Oil Well Fire Fighting Robot*) foi alterado para aplicações relativas com rastreios de áreas nucleares e de lixo tóxico. Este novo *design* foi chamado SPIDER (*Stewart Platform Instrumented Drive Enviromental Robot*). O SPIDER tem vantagens como baixo peso e facilidade de montagem, pode ser tornado móvel quando montado em veículos que permitam avançar entre terrenos agrestes [17].

Caraterísticas

Os principais conceitos assentam na ideia de ligar manipuladores paralelos numa plataforma “Stewart”. A abordagem passa pelo uso de cabos como as ligações paralelas e guinchos utilizados como atuadores. Desde que se mantenha tensão positiva em todos os cabos, é possível calcular a cinemática em relação à carga [18,19]. Os cabos resistem a forças perturbadoras e os momentos de força são igualados tanto em cargas que apresentem forças ascendentes como descendentes. O resultado consiste na suspensão de uma carga, e a sua posição no espaço é influenciada pela elasticidade dos cabos, massa e geometria. Baseado nestes conceitos foi desenvolvido o robô de cabos do NIST que permite controlar a posição, velocidade e forças das ferramentas e maquinaria pesada em todos os graus de liberdade (x , y , z , $roll$, $pitch$ e yaw). Dependendo no que está suspenso na plataforma, este sistema permite desempenhar uma grande variedade de tarefas, tais como: cortar, escavar e nivelar, modelagem e acabamentos, e principalmente, içamento e posicionamento de cargas [16]. A estrutura do Robocrane está representada na Figura 2.7 e uma imagem real é ilustrada na Figura 2.8.

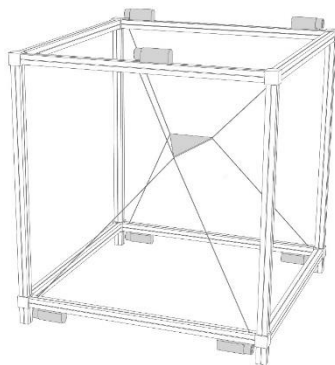


Figura 2.7 - Estrutura do RoboCrane [15]



Figura 2.8 - Aplicação RoboCrane [15]

2.4 - Segesta: The Robot's Net

Engenheiros e matemáticos do departamento de Mecatrônica da universidade de Duisburg - Essen na Alemanha têm vindo a desenvolver um robô de cabos inspirado em teias de aranha, chamado Segesta. A principal motivação encontra-se na enorme possibilidade de levantar cargas de massas superiores quando comparados com robôs convencionais (em certas circunstâncias claro) [21, 22]. Uma imagem do robô Segesta está contida na Figura 2.10.



Figura 2.10 - Segesta [22]

Caraterísticas

Em muitas aplicações industriais, a carga útil de um robô é fulcral, mas insignificante em comparação com a sua própria massa. Isto significa que, quando a carga é transportada para longe, é necessário uma maior proporção de energia para mover o robô do que para acelerar a possível massa adicionada à ferramenta. As grandes consequências são altos consumos de energia e desperdício de recursos [23, 24].

O Segesta contorna algumas desvantagens que os robôs convencionais apresentam. Apenas a inércia da plataforma (que é mínima quando comparada com grandes massas de braços robóticos, por exemplo) e com o momento de inércia dos guinchos dos cabos têm de ser considerados. A própria massa dos cabos pode ser desprezada, e sendo feitos de fibra de alta tecnologia, apresentam elevada resistência à tração [24].

Este robô desenvolvido na Universidade de Duisburg-Essen atinge acelerações até dez vezes a gravidade, e velocidades até dez metros por segundo [25].

Um ponto interessante é que, porque a plataforma tem seis graus de liberdade (translação e rotação), o robô terá de comportar pelo menos sete cabos para fixar a sua posição no espaço. Isto deve-se ao facto dos cabos só conseguirem aplicar tensões positivas. A estrutura paralela produz áreas de trabalho relativamente complexas para os sistemas de estrutura baseados em cabos. As forças que surgem podem ser distribuídas em qualquer número necessário de cabos (e consequentemente guinchos dos cabos), permitindo transportar cargas muito pesadas. As magnitudes concebíveis podem variar dentro de uma grande gama de valores [26].

Controlo

O controlador trabalha com frequências na ordem de 1 quilohertz. Além disso é necessário um controlador para calcular o comprimento e forças dos cabos. O sistema DSpace comporta fiabilidade industrial para uma configuração de teste. O sistema de controlo baseado numa placa DS1005 munida de dispositivos de entradas e saídas (DS2103 Multi-Channel, DS3001 Incremental Encoder Interface Boards, DS4302). A programação foi feita em MATLAB/Simulink [22, 27, 28].

O sistema de controlo tem a seguinte estrutura:

- O sistema interpola a posição e velocidade ao longo da trajetória desejada para proporcionar as variáveis de referência;
- As cinemáticas inversa e direta calculam os comprimentos de cabos e velocidades para se adequar à posição desejada e velocidade;
- Os comprimentos reais dos cabos (e a velocidade real) são determinados através das entradas e saídas do sistema DSpace;
- Um controlador proporcional derivativo (PD) calcula as referências e envia-as para o controlador do motor digital.

A arquitetura do sistema de controlo está representada na Figura 2.11.

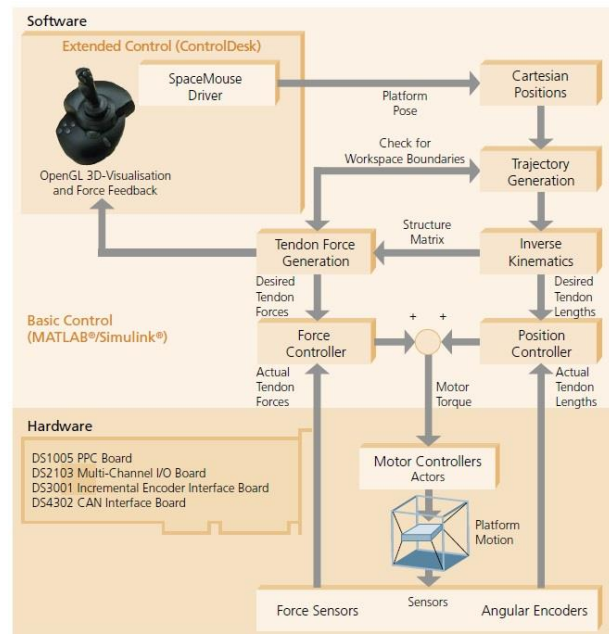


Figura 2.11 - Arquitetura de controle do Segesta [27]

2.5 - A Low-Cost Easy Operation 4-Cable Driven Parallel Manipulator, LARM

O robô de cabos concebido no LARM (*laboratory of robotics and mechatronics*) é composto por uma estrutura mecânica, um controlador, um PC para programação, uma plataforma móvel e uma ferramenta adequada. Este robô faz parte de um sistema de baixo custo e baseia-se numa arquitetura de quatro cabos móveis para deslocar a plataforma [29, 30, 31]. As Figuras 2.12 e 2.13 ilustram o protótipo do LARM, versão três dimensões e no plano, respetivamente.



Figura 2.12 - Protótipo do robô de cabos do LARM [29]

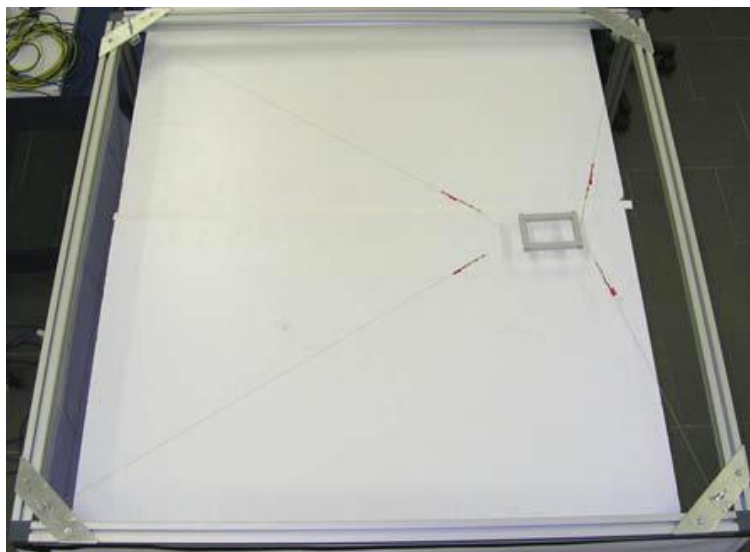


Figura 2.13 - Versão no plano do robô de cabos do LARM [29]

Caraterísticas

O sistema do manipulador proposto é composto por quatro motores de corrente contínua que, juntamente com enroladores acoplados aos motores, variam os comprimentos dos cabos. Por conveniência foi considerada uma estrutura cúbica, a fim de poder operar em qualquer versão plana mas também usado em tarefas espaciais. Em particular, para tarefas no plano foi escolhida uma base fixa quadrada, como mostrado na Figura 2.13, a fim de obter uma estrutura e arquitetura simétricas. Além disso, foram considerados dois pontos de fixação na plataforma. Portanto, os quatro cabos são ligados dois a dois na plataforma móvel como mostrado na Figura 2.13. Esta escolha foi feita de modo a obter as maiores capacidades de orientação [29, 31, 32].

Controlo

O robô pode ser operado por qualquer pessoa sem grandes conhecimentos de manipuladores paralelos e equipamentos de controlo e programação. Portanto, uma escolha adequada é a utilização de PLC's, uma vez que são equipamentos programáveis bem conhecidos em aplicações industriais. O sistema é manipulado com um controlador de baixo custo. O manipulador paralelo do robô determina o movimento através de interpolação de pontos, isto é, é monitorizada a posição angular do enrolador de cada cabo através do número de impulsos do codificador em relação ao tempo. De notar que para uma trajetória de 1 metro no espaço cartesiano, que é o alcance máximo de movimento para cada cabo do protótipo construído, com 16 pontos de interpolação, o robô apresenta uma aproximação de 6,25 centímetros, no pior caso [33, 34, 35]. A Figura 2.14 representa a arquitetura deste protótipo.

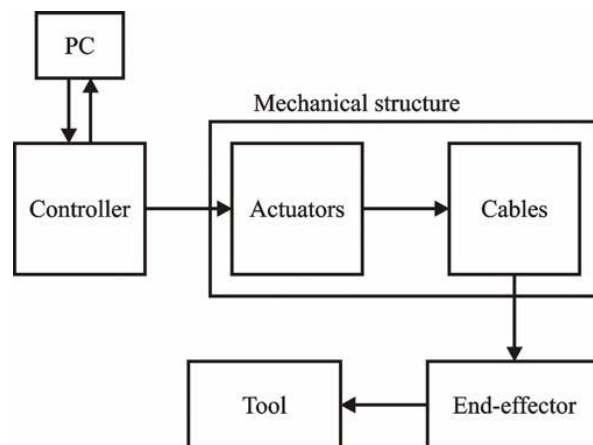


Figura 2.14 - Arquitetura do sistema do robô de cabos LARM [33]

Capítulo 3

Arquitetura

O projeto desenvolvido passou por uma fase de planeamento com vista nos requisitos. O conteúdo que se segue pretende esclarecer as bases em que o projeto assenta, escolhas feitas em relação ao modelo e estrutura e os subsistemas que o compõem. Naturalmente a fase de planeamento deu lugar à construção, nesta secção é também apresentado o *hardware* usado.

3.1 - Estrutura

O objetivo principal da dissertação passou por construir um protótipo de um robô de cabos. Com foco em manter o projeto com custos reduzidos de desenvolvimento, foi pensada numa arquitetura e modelo com poucos recursos. Baixo número de cabos ajuda à redução significativa dos custos mas precisa de ser balanceado com os requisitos pretendidos.

A principal área alvo deste robô é a construção, e por isso é necessário ter em conta alguns fatores como o volume de trabalho, graus de liberdade, precisão, entre outros. Uma arquitetura que combina adequadamente todos estes fatores é a de quatro cabos superiores ao centro de massa da ferramenta. Por conveniência de uso de recursos foi desenvolvido um protótipo com uma estrutura em forma de paralelepípedo de dimensões: 120 centímetros de comprimento, 60 centímetros de largura e 60 centímetros de altura. Os quatro cabos são puxados através de roldanas que se encontram fixas nos quatro vértices superiores da estrutura. A ferramenta encontra-se fixa no centro de uma plataforma retangular (de dimensões: 16 centímetros de comprimento, 10 centímetros de largura e 0,6 centímetros de altura). A plataforma retangular é a única ligação dos quatro cabos, ou seja, em cada um dos quatro vértices da plataforma encontra-se fixo um cabo. A Figura 3.1 ilustra o modelo 3D da estrutura, da plataforma e dos quatro cabos.

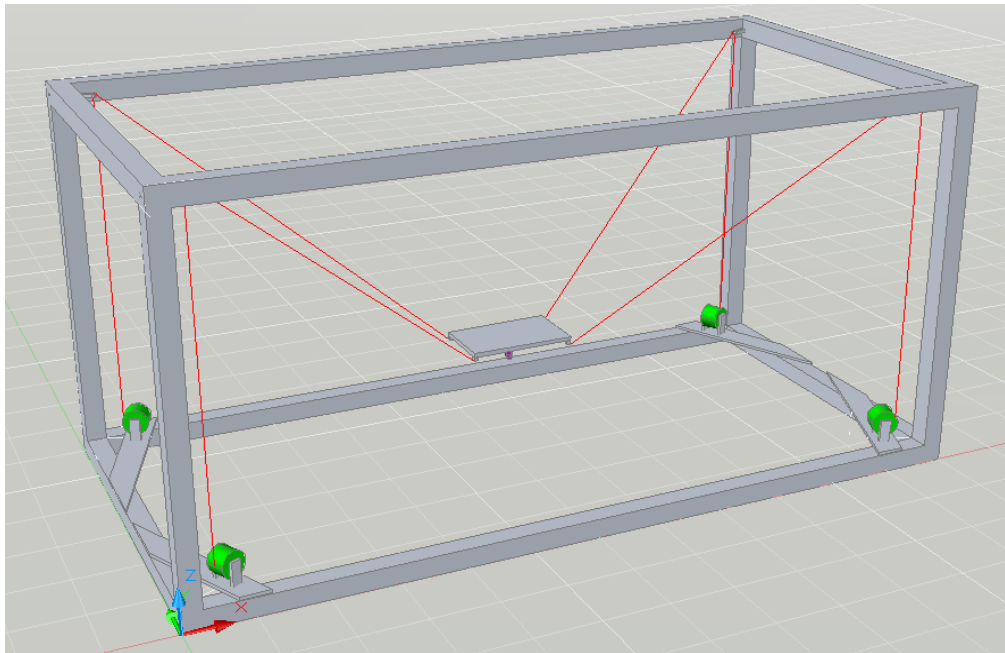


Figura 3.1 - Modelo 3D do robô

A ferramenta instalada é uma garra, com dois pontos circulares. Permite abraçar objetos de pequenas dimensões (largura máxima de 15 centímetros). Esta ferramenta, para além de ter a capacidade de agarrar e largar objetos, permite rodar esse objeto no plano normal à gravidade. A Figura 3.2 representa o modelo 3D da ferramenta.

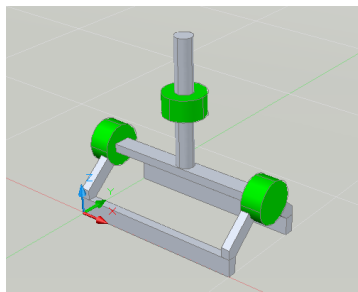


Figura 3.2 - Modelo 3D da Ferramenta

Este tipo robô de cabos apresenta seis graus de liberdade (coordenadas cartesianas referentes ao espaço X , Y e Z , e a orientação da plataforma *Yaw*, *Roll* e *Pitch*). A justificação e explicação da cinemática e orientação da plataforma encontra-se no Capítulo 4.1 e 4.2. Os ângulos *Roll* e *Pitch* contribuem para o volume de trabalho que este robô apresenta.

Como os quatro cabos estão fixos acima do centro de massa da ferramenta, a única força descendente que se apresenta na plataforma, em todos os momentos, é a força gravitacional.

O principal requisito do sistema é o reposicionamento de objetos dentro do volume da estrutura do robô em planos paralelos ao tampo inferior da estrutura, ou seja, paralelos ao plano XY .

A partir destas três premissas, conclui-se que o ideal para reposicionar objetos é manter as duas inclinações da plataforma *Roll* e *Pitch* (ângulos referentes aos planos *XZ* e *YZ*, respectivamente) em valores nulos. Para isso foi usado um componente mecânico que permite que a orientação da ferramenta seja sempre na direção da gravidade (diretamente para baixo) independentemente da orientação da plataforma. Este componente mecânico é um *Cardan*, e segue os princípios mecânicos de uma articulação universal, Figura 3.3.

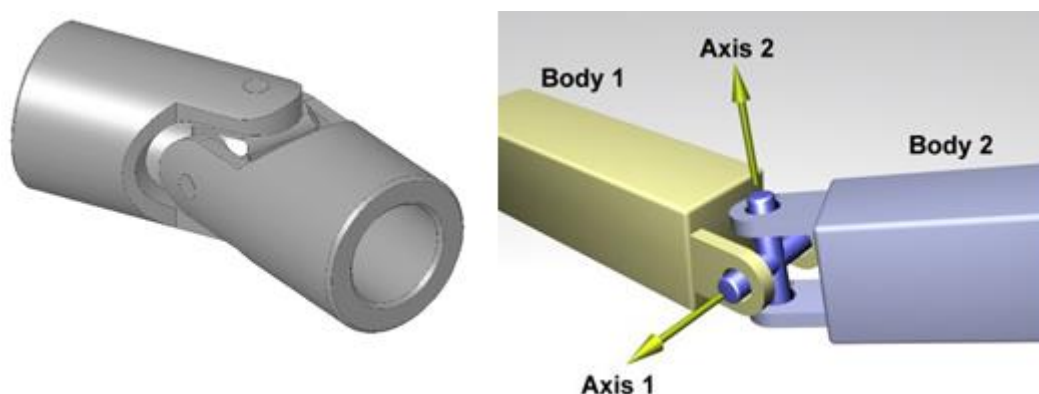


Figura 3.3 - Cardan / articulação universal [36].

As Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 ilustram, em várias vistas no espaço o modelo 3D do sistema completo.

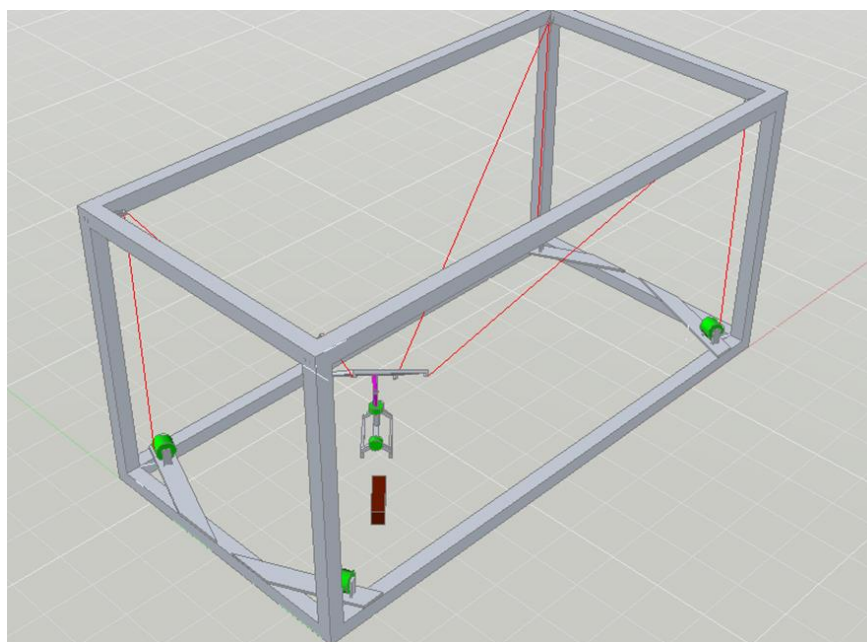


Figura 3.4 - Modelo 3D do sistema - vista SO

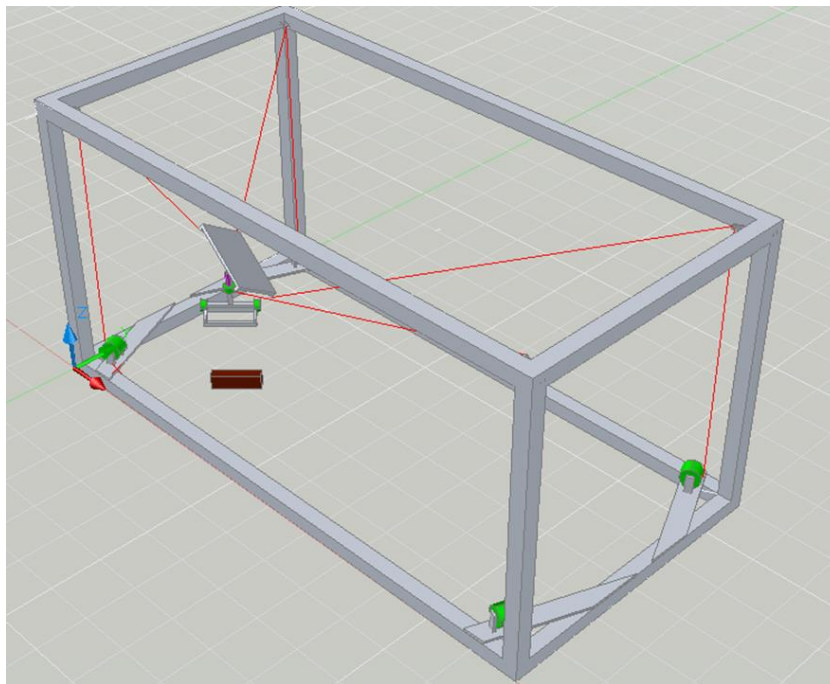


Figura 3.5 - Modelo 3D do sistema - vista SE

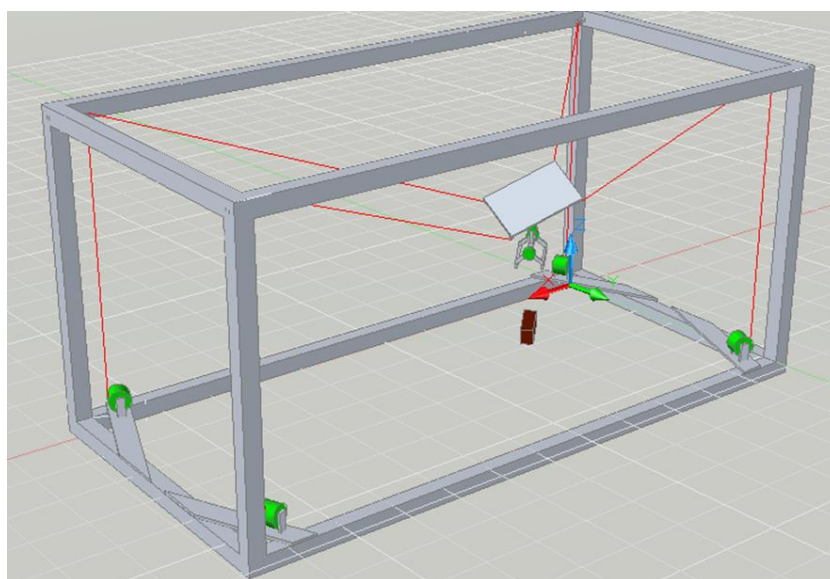


Figura 3.6 - Modelo 3D do sistema - vista NO

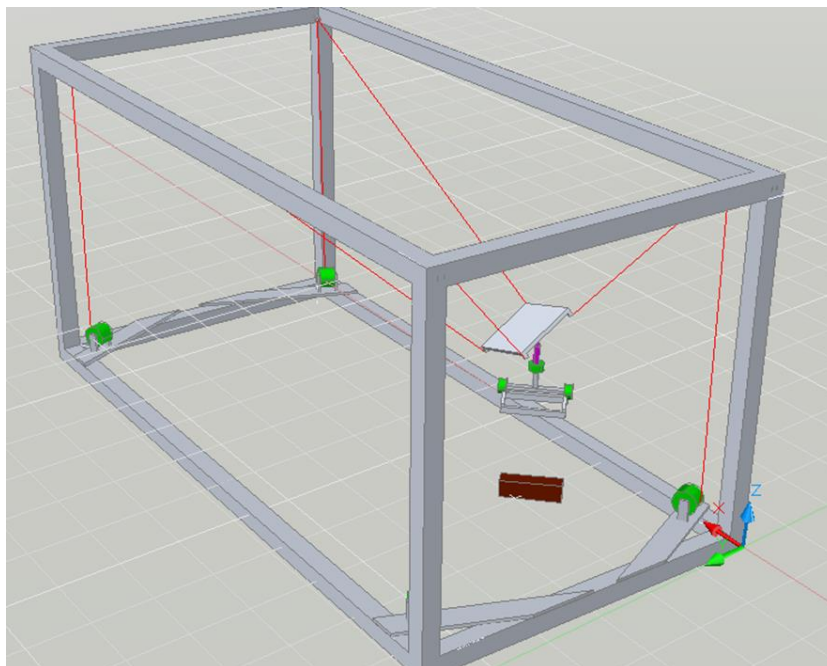


Figura 3.7 - Modelo 3D do sistema - vista NE

3.2 - Subsistemas

O sistema é composto por vários componentes que interagem entre si, de modo a executar um conjunto de tarefas. É possível separar em duas grandes partes integrantes: *Hardware e Software*.

Dos componentes físicos que constituem o *hardware*, apresentados na Secção 3.3, os únicos responsáveis pela manipulação direta da plataforma do robô são os *encoders* e os servos motores. Estes dois últimos correspondem às entradas e saídas do sistema de controlo, respetivamente.

Toda a parte de programação, processamento e controlo é feito digitalmente através dum Software instalado num PC (*personal computer*) com Microsoft Windows instalado.

O Software comporta três subsistemas:

- Interface com o utilizador;
- Processamento das variáveis de referência;
- Controlo das saídas do sistema.

O sistema é monitorizado e programado para fazer tarefas predefinidas pelo Utilizador através de uma interface gráfica GUI (*graphical user interface*). Com esta ferramenta o utilizador pode receber e fornecer informação ao sistema. Tarefas como arrancar e parar o

sistema, introduzir uma lista de trabalhos, saber o estado do sistema, entre outras, são feitas através desta interface (Secção 5.3).

As únicas partes móveis do robô são a plataforma e os quatro cabos puxados pelos quatro servos motores. Os únicos responsáveis pelo posicionamento, orientação e deslocamento da plataforma do robô são os quatro cabos. Assim sendo as variáveis do sistema são os quatro comprimentos dos quatro cabos, pois influenciam diretamente os cinco graus de liberdade da plataforma. Dois dos cinco graus de liberdade do sistema (inclinações *Roll* e *Pitch* da plataforma) precisam de ser calculados e previstos (a justificação para este facto encontra-se nos Secções 4.1 e 4.2). Este subsistema interpola as duas posições da plataforma (real e referência) e providencia as variáveis de referência através da cinemática inversa. Portanto recebe informação do subsistema imediatamente acima (GUI), ou seja, recebe os vários destinos da plataforma e determina os comprimentos dos cabos das posições de destino.

Depois de tratada informação, é necessário fazer com que as variáveis do sistema (comprimentos dos cabos) tomem os valores das variáveis de referência calculadas no subsistema “Processamento das variáveis do sistema”. Para isso é necessário controlar os comprimentos dos cabos. Os comprimentos dos cabos variam conforme os enroladores acoplados aos servo motores. A informação dos comprimentos reais dos cabos (variáveis do sistema) é fornecida pelos *encoders* através do sistema de E/S. Os comprimentos dos cabos são manipulados através da subtração numérica entre os valores das variáveis de referência (comprimentos de referência dos cabos) e os valores das variáveis do sistema (comprimentos reais dos cabos). A velocidade dos servo motores é controlado por um controlador PD.

O esquema da Figura 3.8 representa a interação entre as partes do sistema geral.

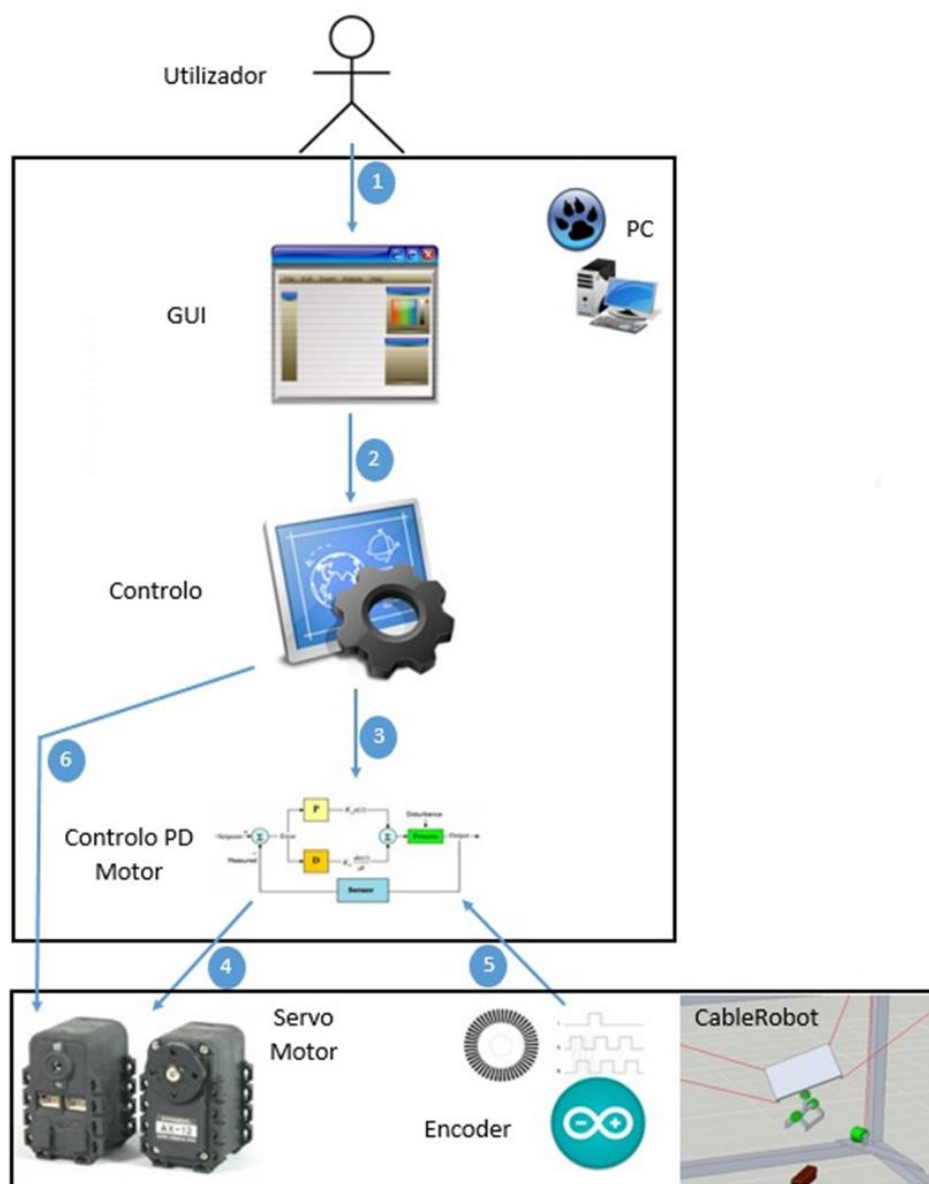


Figura 3.8 - Representação das interações do sistema

As interações entre as várias partes do sistema estão representadas por setas numeradas de um (1) a seis (6) no esquema da Figura 3.8.

Para uma melhor perceção da evolução do sistema implementado, seguidamente são analisadas as ligações dos subsistemas da Figura 3.8:

1. Ligação entre o Utilizador e o Sistema. Serve para ordenar e monitorizar Trabalhos ao robô. É realizada através de um *software* com interface gráfica, GUI, instalado num PC;

2. Para que o programa execute uma ordem de trabalhos é necessário calcular as variáveis de referência de acordo com as ordens. Para isso, essa informação é importada do GUI para o programa de Controlo;

3. Depois de determinadas as variáveis de referência, é necessário garantir que as variáveis do sistema tendam para as variáveis de referência. Para controlar a velocidade de cada servo motor, é usado um Controlador PD. Este tipo de controlador permite obter bons resultados de precisão e curvas de desaceleração suaves (posicionamento da plataforma mais estável);

4. Ligação física entre o PC (onde se encontra todo o processamento) e os quatro servo motores responsáveis pelo comprimento dos quatro cabos. Para que esta comunicação seja possível é usado um dispositivo de E/S UART (*universal asynchronous receiver/transmitter*), o USB2Dynamixel;

5. A posição angular de cada enrolador dos quatro cabos é lida através de quatro *encoders*. Os impulsos são contados por um microcontrolador (Arduino Uno R3). Os *encoders* encontram-se ligados num barramento e cada um tem um *ID*. É aproveitada a ligação USB que esta placa contém para fazer-se a comunicação com o PC;

6. A manipulação física da ferramenta é feita através de dois servo motores (um para a rotação e outro para a abertura e fecho da garra) similares aos restantes quatro servo motores. A comunicação é feita através do mesmo canal de comunicação UART.

3.3 - Hardware

A implementação do projeto passou por se desenvolver um protótipo em pequena escala de um robô de quatro cabos. A escolha dos componentes necessários para a construção do robô passou por um período de estudo da mecânica da estrutura pretendida e requisitos do sistema. Um dos requisitos do projeto é o baixo custo de desenvolvimento.

De acordo com o modelo definido surgiu, inicialmente, a necessidade de adquirir, construir ou desenvolver vários componentes e periféricos.

Componentes:

- 1 Estrutura metálica;
- 1 Plataforma móvel;
- 1 Ferramenta;
- 4 Cabos;
- 4 Enroladores de cabos;
- 4 Roldanas;
- 4 Motores (servo motores);
- 4 Contadores de comprimento de cabos (*encoders*);

Periféricos:

- 1 Unidade de processamento (PC) com Microsoft Windows instalado;
- 1 Microcontrolador;

3.2.1 - Estrutura, roldanas e cabos

A estrutura é o componente base que suporta todas as partes constituintes do robô de cabos, incluindo periféricos. Tem a forma de um paralelepípedo oco. A sua construção é feita em alumínio usando perfis normalizados. Estes perfis de alumínio são de fácil montagem e fornecem propriedades mecânicas adequadas ao projeto. As quatro roldanas por onde passam os quatro cabos estão fixas nos quatro vértices superiores da estrutura e têm 7 milímetros de diâmetro. Os quatro cabos usados são fio de *nylon* resistente de 0,7 milímetros de diâmetro. A Figura 3.9 ilustra um vértice superior da estrutura, isto é, a união de três arestas de perfil de alumínio onde se encontra a roldana de um dos cabos.



Figura 3.9 - Estrutura metálica, roldanas e cabos

3.2.2 - Plataforma móvel e ferramentas

A plataforma móvel é a estrutura de ligação dos quatro cabos. Pode acoplar vários tipos de ferramenta, mas neste caso foi instalada uma garra que permite pegar e rodar objetos. A ferramenta está fixa no centro da plataforma através de um *Cardan*, para que a orientação da ferramenta seja indiferente à orientação da plataforma.

A ferramenta tem a capacidade de agarrar e rodar objetos de pequena dimensão (largura máxima aconselhada de 15 centímetros). A rotação, abertura e fecho da garra são

proporcionados por dois servo motores idênticos aos outros quatro instalados nos guinchos dos cabos. A Figura 3.10 mostra a plataforma móvel e ferramenta (garra).

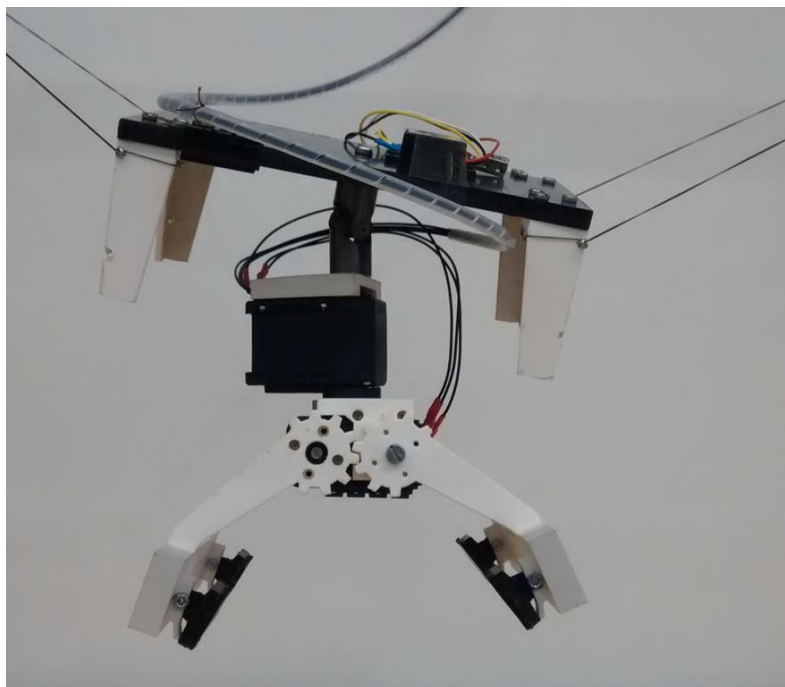


Figura 3.10 - Plataforma e Ferramenta

3.2.3 - Manipuladores de cabos

O comprimento de cabo varia conforme a rotação de um cilindro (perpendicular ao cabo), chamado enrolador, com 40 milímetros de diâmetro e 30 milímetros de altura. O enrolador foi desenhado especificamente para o diâmetro do cabo usado, com passo de rosca de 1,5 milímetros.

A rotação do enrolador é proporcionada por um servo motor com os eixos coincidentes com o enrolador. Os servo motores são quatro Dynamixel AX-12 da ROBOTIS. Este modelo de servo motor permite o controlo de posição, velocidade e binário de vários exemplares em simultâneo, através da mesma porta de comunicação.

Especificações do servo motor ROBOTIS Dynamixel AX-12:

- Controlo velocidade:
 - o Binário máximo de retenção: 0,165 newton metro;
 - o Velocidade máxima: 0,196 seg/60°;
- Controlo posição:
 - o Precisão: 0,35°;
 - o Limite angular: 300°.

A Figura 3.11 representa um dos guinchos de um dos cabos (suporte, servo motor, enrolador e *encoder* acoplados). O enrolador e o suporte dos componentes do guincho foram fabricadas numa impressora 3D.

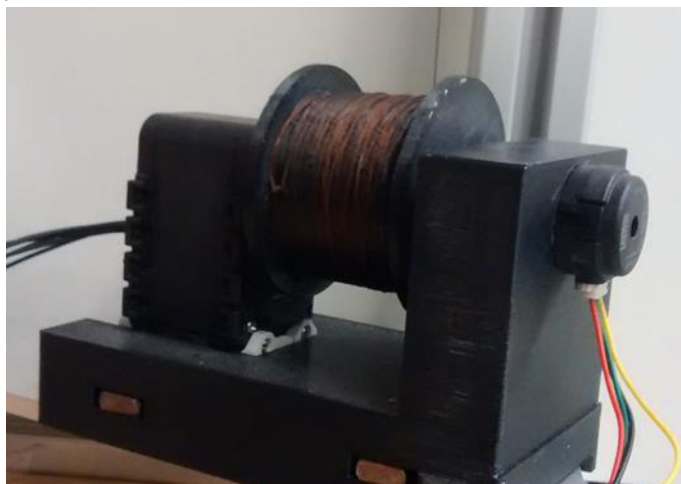


Figura 3.11 - Guincho de um cabo

Para que o sistema receba em tempo real a posição angular do guincho foi instalado um *encoder* no eixo de rotação do enrolador. Apesar de o servo motor conter um *encoder* internamente, este não é adequado ao uso nesta aplicação porque tem uma zona “cega”. Esta zona “cega” prejudica a precisão pois a leitura angular não é constante. A contagem de voltas do enrolador é fulcral para posterior cálculo do comprimento do cabo correspondente. Os *encoders* usados são quatro USDIGITAL E4P-100-079-H.

Especificações do *encoder* USDIGITAL E4P-100-079-H:

- 100 CPR (*cycles per revolution*);

De acordo com descodificação feita, é obtida uma leitura de 400 pontos por rotação.

A descodificação dos sinais dos *encoders* e comunicação com o principal sistema de processamento (PC) é feita por uma placa microprocessador Arduino Uno R3.



Figura 3.12 - Arduino Uno R3

A Figura 3.13 ilustra o sistema com todos os componentes do *hardware* montados e prontos a serem usados.

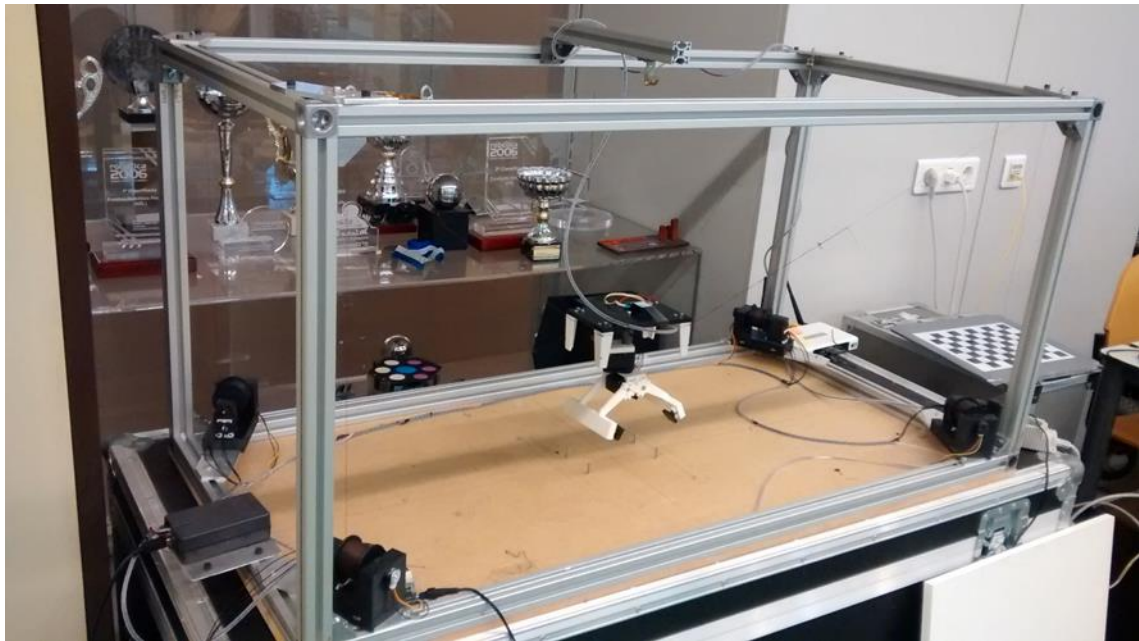


Figura 3.13 - Sistema real completo

Capítulo 4

Modelo do Sistema

4.1 - Cinemática

Cinemática de robôs representa o estudo da mecânica que descreve o movimento da estrutura robótica. A cinemática direta permite o cálculo das coordenadas e orientação da extremidade do manipulador a partir do valor de cada articulação. A cinemática inversa determina os valores de coordenadas das articulações quando é conhecida a localização da extremidade. Nesta secção é apresentada a análise da cinemática inversa e direta de posição para várias versões de robô de quatro cabos.

4.1.1 - Modelo simplificado

Cinemática é relativa às variáveis das articulações (eixos de fixação dos cabos) e posição do ponto móvel (extremidade dos cabos) nos eixos Cartesianos. Os ângulos dos cabos e comprimentos dos cabos são determinantes para o cálculo da posição do ponto móvel. Assumindo que todos os cabos estão sempre em tensão, a cinemática deste sistema é semelhante à cinemática de robôs de atuadores paralelos [37]. Nesta secção é apresentada a análise da cinemática inversa e direta de posição da versão no plano de um robô de quatro cabos, o exemplo mais simples e em que se baseia toda a análise do problema.

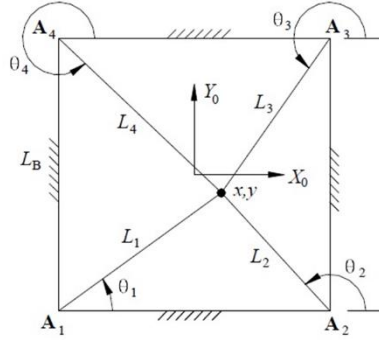


Figura 4.1 - Modelo simplificado

O problema de cinemática inversa é resolvido pela norma Euclidiana entre a posição do ponto móvel $P = \{x \ y\}^T$ e cada ponto fixo em cada vértice ($A1$, $A2$, $A3$ e $A4$). Com isto são calculados os comprimentos dos cabos ($L1$, $L2$, $L3$ e $L4$):

$$Li = \sqrt{(x - Aix)^2 + (y - Aiy)^2}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.1)$$

Para determinar os ângulos dos cabos em relação ao eixo XY :

$$\theta i = \tan^{-1} \frac{y - Aiy}{x - Aix}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.2)$$

A cinemática direta permite calcular a posição do ponto móvel $P = \{x \ y\}^T$, dados os comprimentos dos cabos Li . Este problema é restrito a valores consistentes de Li .

Primeiramente consideremos os cabos 1 e 2. O problema pode ser simplificado deslocando a origem do referencial para $A1$, portanto, $A1 = \{0 \ 0\}^T$ e $A2 = \{L_B \ 0\}^T$. A solução da cinemática direta corresponde à intersecção de dois círculos, um centrado em $A1$ de raio $L1$, e o outro centrado em $A2$ de raio $L2$. O resultado é o seguinte:

$$x = \frac{L_B^2 + L1^2 - L2^2}{2 * L_B} \quad (4.3)$$

$$y = \pm \sqrt{L1^2 - x^2} \quad (4.4)$$

Naturalmente é escolhida a solução positiva de y na equação anterior para assegurar que a solução da cinemática direta se mantenha dentro dos limites do polígono (que neste caso é um quadrado). Assim, para as múltiplas possibilidades (é possível usar quaisquer dois cabos para obter a solução), existe uma única solução correta. De notar que o valor de x na equação anterior é único devido à geometria de carácter especial dos cabos 1 e 2 (ambos valores de y têm o mesmo valor de x).

Para finalizar esta solução é necessário voltar e deslocar o referencial, desta vez para a posição original. Este método pode ser aplicada em qualquer robô de cabos de duas dimensões (no plano) de n cabos.

4.1.2 - Modelo simplificado com plataforma retangular

Adaptando a análise da cinemática do caso mais simples dado em 4.1.1 para um caso de estudo um pouco mais completo é necessário adaptar alguns conceitos e dimensões.

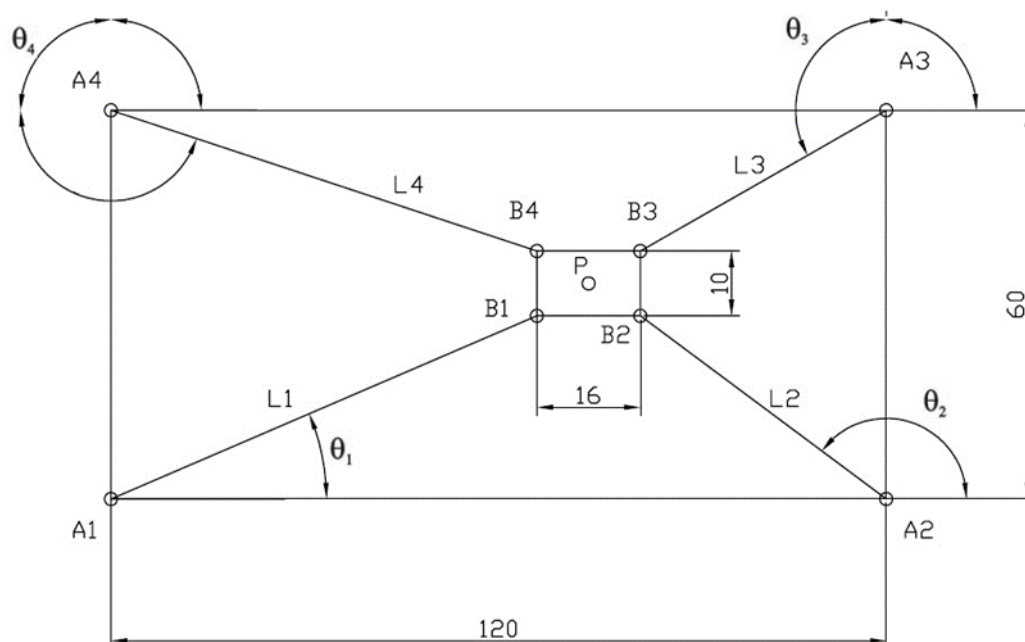


Figura 4.2 - Modelo simplificado com plataforma

Na Figura 4.2 está representado com mais detalhe o sistema real mas na versão plana. A origem do referencial Cartesiano (x, y) é coincidente com o ponto A1.

A estrutura tem dimensões 120 centímetros de comprimento e 60 centímetros de largura e a plataforma 16 centímetros de comprimento e 10 centímetros de largura.

O problema de cinemática inversa é semelhante ao caso anterior mas neste caso tem-se quatro pontos móveis ($B1, B2, B3$ e $B4$).

Como estamos a analisar a versão no plano XY ($Z=0$) os graus de liberdade *Roll* e *Pitch* tomam o valor nulo, ou seja, $B1x=B4x$; $B2x=B3x$; $B1y=B2y$; $B3y=B4y$. O ângulo *Yaw* também é considerado zero devido à arquitetura e geometria da estrutura e da plataforma (ambas

retangulares) serem coincidentes. Portanto o ponto $P = \{x \ y\}^T$ encontra-se sempre na mesma posição em relação aos pontos coincidentes com os vértices da plataforma.

Para calcular os comprimentos dos cabos basta fazer a norma Euclidiana entre a posição de cada ponto da plataforma ($B_i = \{x \ y\}^T$, $i=1,...,4$) e cada ponto fixo em cada vértice da estrutura ($A_i = \{x \ y\}^T$, $i=1,...,4$). Como o ponto relevante é o ponto P (ponto onde se encontra a ferramenta), é necessário fazer o cálculo das coordenadas dos pontos B_i através do posicionamento de P em relação à origem do referencial (de notar as dimensões da plataforma):

$$B_{ix} = P_x \pm \frac{\text{Comprimento da plataforma}}{2}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.5)$$

$$B_{iy} = P_y \pm \frac{\text{Largura da plataforma}}{2}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.6)$$

Os comprimentos dos cabos são dados por:

$$L_i = \sqrt{(B_{ix} - A_{ix})^2 + (B_{iy} - A_{iy})^2}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.7)$$

4.1.3 - Modelo simplificado 3D com plataforma retangular

Acrescentando um eixo ao referencial Cartesiano do sistema anterior fica-se com x,y e z. Tem-se então a análise do sistema no espaço. A origem do referencial Cartesiano (x, y, z) é coincidente com o ponto A1.

$$A1_{(x,y,z)} = (0,0,0)$$

$$A2_{(x,y,z)} = (120,0,0)$$

$$A3_{(x,y,z)} = (120,60,0)$$

$$A4_{(x,y,z)} = (0,60,0)$$

A estrutura tem dimensões 120 centímetros de comprimento, 60 centímetros de largura e 60 centímetros de altura, e a plataforma 16 centímetros de comprimento e 10 centímetros de largura.

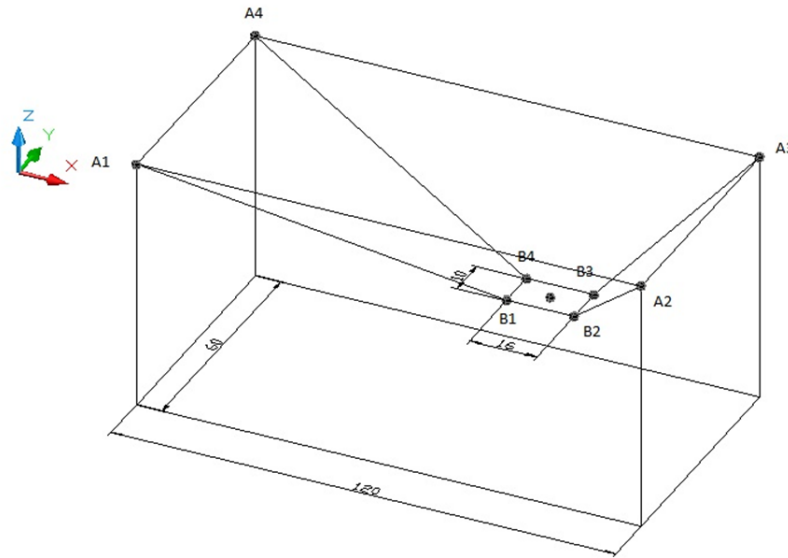


Figura 4.3 - Modelo simplificado 3D com plataforma

Analisando o problema geral por fases, nesta secção a cinemática é desenvolvida assumindo que os graus de liberdade correspondentes aos ângulos *Yaw*, *Pitch* e *Roll* são nulos, tal como no exemplo anterior: $B1x = B4x$; $B2x = B3x$; $B1y = B2y$; $B3y = B4y$; $B1z = B2z = B3z = B4z$. A plataforma é mantida paralela ao plano XY.

Basta então acrescentar uma coordenada (dos ZZ) ao sistema anterior. É necessário calcular as coordenadas dos pontos móveis onde fixam os quatro cabos. Como o ponto pertinente é o ponto central da plataforma (ponto onde é fixa a ferramenta):

$$Bix = Px \pm \frac{\text{Comprimento da plataforma}}{2}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.8)$$

$$Biy = Py \pm \frac{\text{Largura da plataforma}}{2}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.9)$$

$$Biz = Pz, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.10)$$

Os comprimentos dos cabos são dados por:

$$Li = \sqrt{(Bix - Aix)^2 + (Biy - Aiy)^2 + Biz^2}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.11)$$

4.1.4 - Modelo real

Fazendo agora uma análise mais realista e fiel do sistema final, é necessário considerar todos os graus de liberdade em causa: *X*, *Y*, *Z*, *Yaw*, *Pitch* e *Roll*.

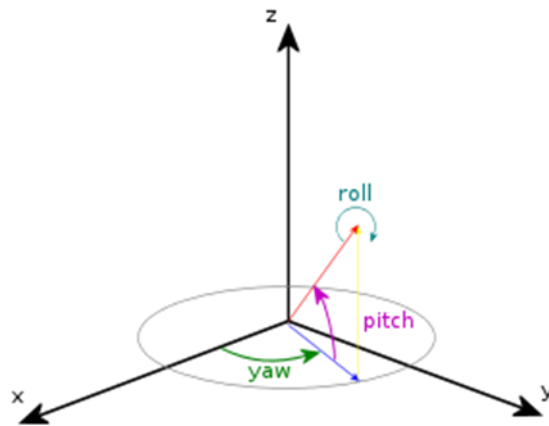


Figura 4.4 - *Yaw*, *Pitch* e *Roll* no referencial Cartesiano

As dimensões da geometria da estrutura e da plataforma fazem com que o grau de liberdade *Yaw* tenha uma gama de valores muito reduzida devido à distância entre pontos de fixação dos cabos da plataforma e direções para onde os cabos são puxados (neste caso correspondem aos quatro vértices superiores da estrutura). A geometria da estrutura e da plataforma são coincidentes, ambas retangulares (vista do plano (*x*, *y*)).

De acordo com os requisitos do sistema, o robô tem de ter a capacidade de produzir o valor do ângulo *Yaw* na ferramenta. De notar que esta rotação tem de apresentar uma precisão considerável e assumir valores acima dos 90°.

Portanto, o sistema foi projetado de maneira a que a rotação *Yaw* da ferramenta fosse manipulada, não pelos cabos, mas sim pela própria ferramenta. Assim foi acrescentado um servo motor entre a plataforma e a garra do robô (os dois constituem a ferramenta). O ângulo *Yaw* da plataforma é forçado em valores próximos de zero de forma que este seja desprezável.

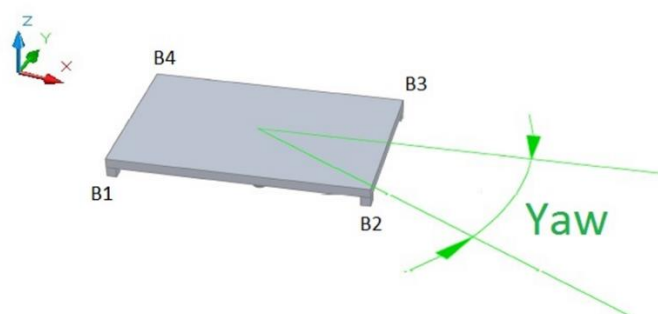


Figura 4.5 - *Yaw* na plataforma

O eixo do servo motor encontra-se sempre na direção dos ZZ e com sentido coincidente com a gravidade (-Z), graças ao *Cardan* montado no centro da plataforma, que fixa a ferramenta com a plataforma.

Baseando nestas premissas, a rotação *Yaw* da ferramenta assumirá valores definidos pelo servo motor e a rotação *Yaw* da plataforma manter-se-á zero.

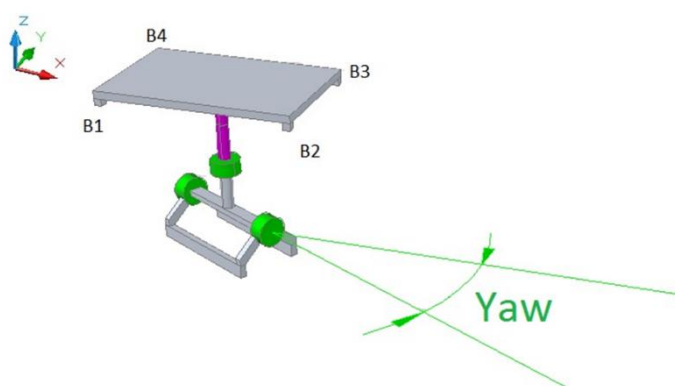


Figura 4.6 - Yaw na ferramenta

Com isto, o sistema passa a ter cinco graus de liberdade, aquando da análise da cinemática do sistema sem ferramenta, somente analisando o comportamento posicional da plataforma em relação aos comprimentos dos cabos.

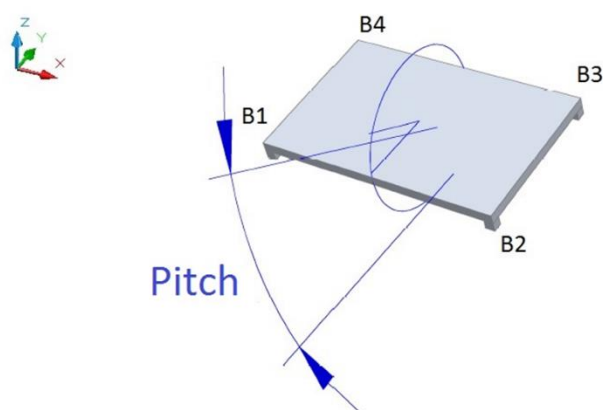


Figura 4.7 - Pitch na plataforma

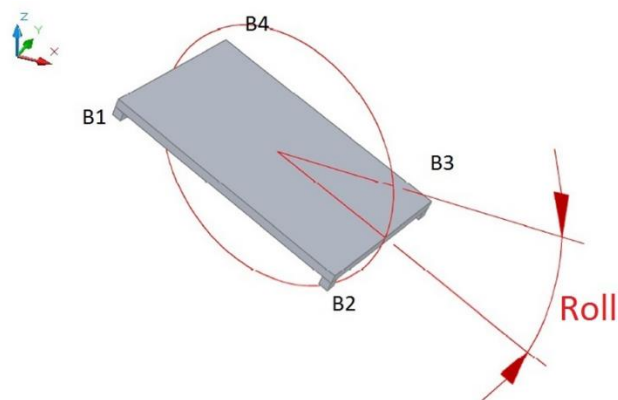
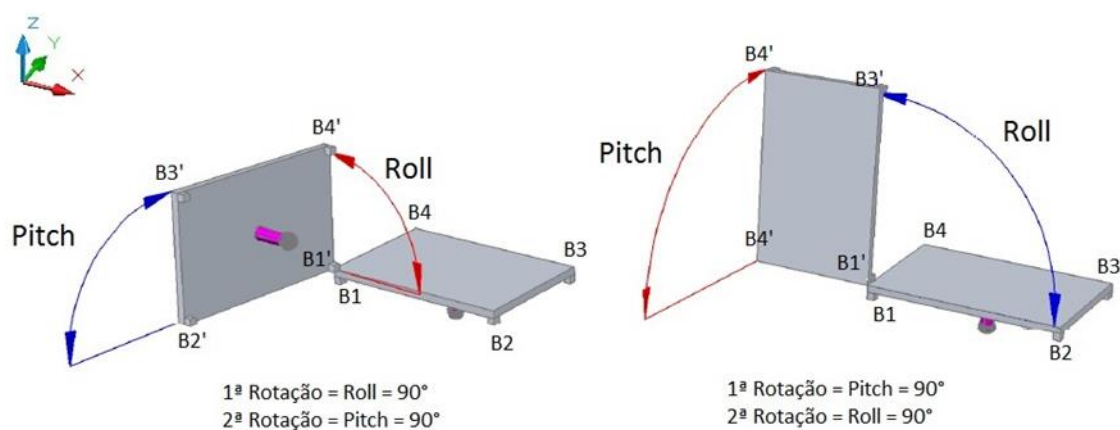


Figura 4.8 - Roll na plataforma

Considerando estes dois graus de liberdade, as rotações *Pitch* e *Roll*, o cálculo das coordenadas dos pontos $B1$, $B2$, $B3$ e $B4$ não é tão simples como no modelo anterior, neste caso o cálculo terá componentes trigonométricos devido aos dois ângulos que surgem.

A análise destes dois ângulos, *Roll* e *Pitch* é feita sempre em função do referencial Cartesiano com origem no vértice superior direito da estrutura do robô ($A1$). A combinação das duas rotações implica que a ordem em que estas são executadas seja determinante, ou seja, o posicionamento e orientação no espaço da plataforma fazendo uma rotação *Roll* e depois uma rotação *Pitch*, é diferente se essas duas rotações forem executadas na ordem inversa. A Figura 4.9 demonstra este fenómeno no caso dos dois ângulos de 90° , para melhor percepção. As coordenadas dos pontos P , $B1$, $B2$, $B3$ e $B4$ diferem do primeiro caso para o segundo caso da Figura 4.9.

Figura 4.9 - Ordem das rotações *Roll* e *Pitch*

Considera-se que a primeira rotação corresponde a *Roll* e a segunda a *Pitch*.

A Figura 4.10 condiz com a vista do robô do plano XZ . Ao aplicar-se uma rotação de valor α (*Roll*) à plataforma (eixo de rotação coincide com o ponto P), as coordenadas dos pontos $B1, B2, B3$ e $B4$ alterar-se-ão para $B1', B2', B3'$ e $B4'$, correspondentemente; e o ponto P manter-se-á no mesmo sítio. Esta rotação só afeta as coordenadas x e z , y mantém-se.

1ª Rotação = α (Roll):

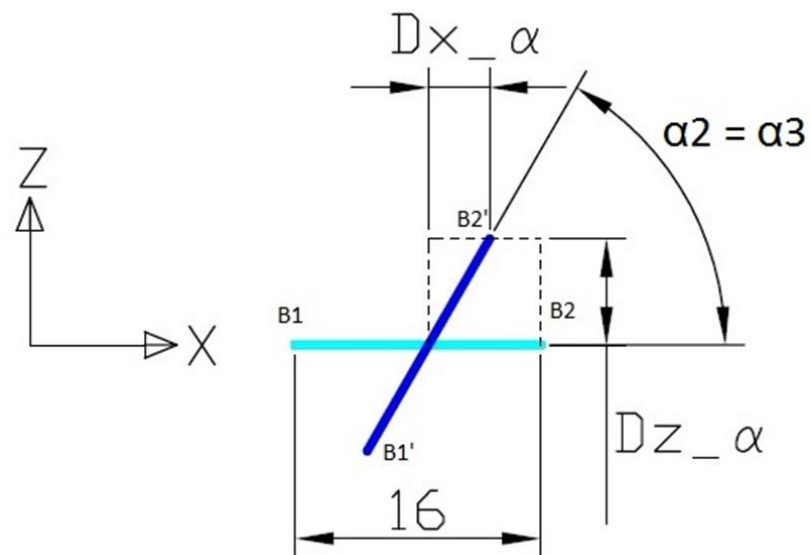


Figura 4.10 - 1ª Rotação, Roll - plano XY

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$$

$$\alpha_1 = \alpha_4 = \alpha + \pi$$

Cálculo das distâncias e ângulos relevantes que os pontos produziram após a primeira rotação:

$$Dx_{\alpha i} = \frac{\text{Comprimento da plataforma}}{2} * \cos \alpha i, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.12)$$

$$Dz_{\alpha i} = \frac{\text{Comprimento da plataforma}}{2} * \sin \alpha i, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.13)$$

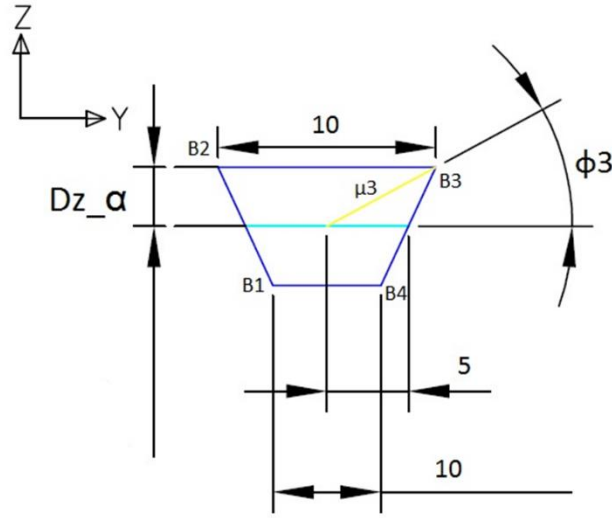


Figura 4.11 - 1ª Rotação, *Roll* - plano YZ

A Figura 4.11 representa a vista do plano YZ após a primeira rotação (*Roll*). O vetor μi tem origem no ponto P e extremidade um dos quatro pontos B . É relevante calcular a norma Euclidiana de μi e o ângulo que este faz em relação ao eixo dos YY .

$$\|\mu i\| = \sqrt{\left(\frac{\text{Largura da plataforma}}{2}\right)^2 + (Dz_{\alpha i})^2}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.14)$$

$$\phi 3 = \sin^{-1} \frac{Dz_{\alpha i}}{\mu 3}$$

$$\phi 2 = \pi - \phi 3$$

$$\phi 1 = \pi + \phi 3$$

$$\phi 4 = 2\pi - \phi 3$$

2ª Rotação = β (Pitch):

Após a segunda rotação a vista do plano YZ passa a ser igual à Figura 4.11 mas rodada β graus, a vista do plano YZ fica como representado na Figura 4.12.

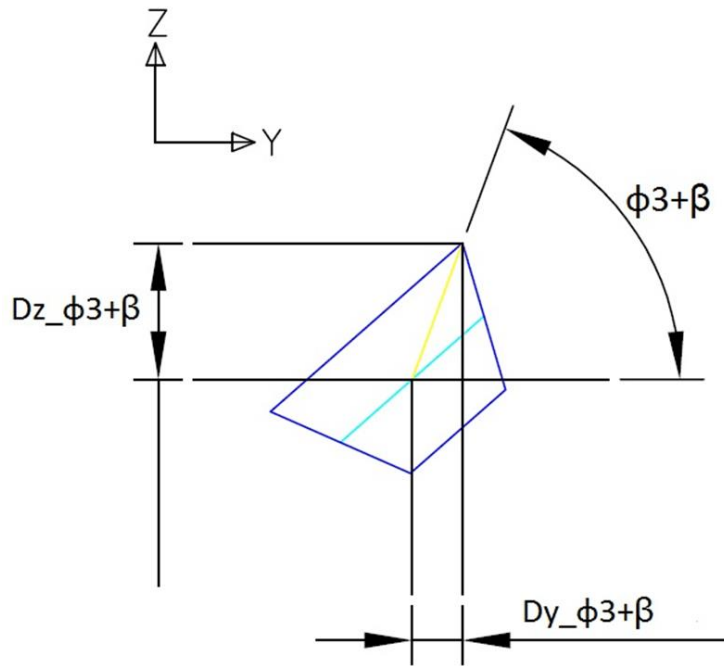


Figura 4.12 - 2ª Rotação, Pitch - plano YZ

Os deslocamentos de cada ponto B nas componentes Y e Z (Pitch não afecta X):

$$Dy_{\phi i + \beta} = \|\mu i\| * \cos(\phi i + \beta), \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.15)$$

$$Dz_{\phi i + \beta} = \|\mu i\| * \sin(\phi i + \beta), \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.16)$$

Basta somar os deslocamentos calculados ao ponto central P para achar todas as componentes dos pontos B :

$$Bix = Px + Dx_{\alpha i}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.17)$$

$$Biy = Py + Dy_{\phi i + \beta}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.18)$$

$$Biz = Pz + Dz_{\phi i + \beta}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.19)$$

Por fim, resta fazer o cálculo dos comprimentos dos quatro cabos, tal como nos casos anteriores:

$$L_i = \sqrt{(B_{ix} - A_{ix})^2 + (B_{iy} - A_{iy})^2 + B_{iz}^2}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.20)$$

4.2 - Estudo *Roll* e *Pitch*

Com os cálculos da cinemática inversa apresentados no capítulo anterior (4.1), mais concretamente em 4.1.4, é possível determinar as coordenadas dos pontos relevantes da plataforma, isto é, B_1 , B_2 , B_3 e B_4 através dos cinco graus de liberdade. Estes cinco graus de liberdade são: as coordenadas do ponto P (P_x , P_y e P_z) e as duas inclinações que a plataforma pode tomar (*Roll* e *Pitch*).

$$f(P_x, P_y, P_z, Roll, Pitch) = (L_1, L_2, L_3, L_4) \quad (4.21)$$

Apesar de as duas rotações *Roll* e *Pitch* da plataforma serem muito importantes para aumentar, em muito, o volume de trabalho, não constituem dois graus de liberdade que se possam ser determinados facilmente na componente teórica.

Sabe-se à partida que para quatro comprimentos dos quatro cabos (L_1 , L_2 , L_3 e L_4) só existe um único valor para cada variável dos cinco graus de liberdade (X , Y , Z , *Roll* e *Pitch*), ou seja, a cinemática direta só tem uma solução.

Isto deve-se ao facto de que a gravidade ser uma força determinante neste tipo de robô de cabos. A única força descendente (sentido $-Z$) é a força gravítica porque o sistema só tem cabos ligados à plataforma através de pontos (A_1 , A_2 , A_3 e A_4) que se encontram acima do centro de massa da plataforma. O centro de massa da plataforma é sempre, aproximadamente, a meio da plataforma (Comprimento da plataforma/2 e Largura da plataforma/2) porque a massa adicionada à plataforma, incluindo a massa da ferramenta, encontra-se fixa ao *Cardan*.

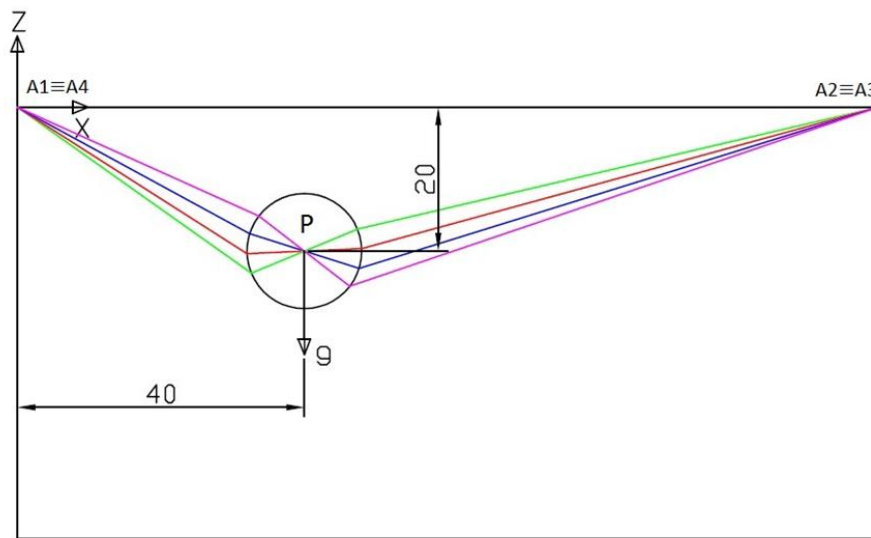


Figura 4.13 - Grau de liberdade *Roll* - plano XZ

Analiticamente e de acordo com os cálculos geométricos, é possível ter-se qualquer valor de *Roll* e *Pitch* em qualquer posição no espaço do ponto P (dentro da estrutura do robô, ou seja, $0 \leq X \leq 120$; $0 \leq Y \leq 60$; $0 \geq Z \geq -60$). A Figura 4.13 representa isso mesmo, qualquer linha cujo comprimento é igual ao diâmetro do círculo de centro no ponto P , representa a orientação que a plataforma pode adquirir (vista do plano XZ).

De salientar que os cabos só têm possibilidade de realizar tensões positivas e não negativas, ou seja, só é possível puxar a plataforma com os cabos.

Na prática existem Leis da Física, como a II Lei de Newton, que impedem a possibilidade de se conseguir obter quaisquer valores de *Roll* e *Pitch* numa determinada posição. Na realidade o que verifica é que para cada ponto no espaço (mais uma vez dentro da estrutura) apresenta uma possível gama de valores obtível de *Pitch* e *Roll*. A maior gama de valores possíveis de *Roll* e *Pitch* é maior no centro do plano XY da estrutura ($X=60$ e $Y=30$). A gama estreita-se com o aumento de Z e com o afastamento do centro do plano XY da estrutura ($X=60$ e $Y=30$).

4.2.1 - Estudo da orientação da plataforma

Os estudos que se seguem tiveram o propósito de perceber o comportamento das inclinações da plataforma consoante a posição no espaço do centro de massa da mesma. Com o conhecimento adquirido deste estudo é possível determinar uma equação aproximada que, em função da posição no espaço do centro de massa da plataforma (P_x , P_y e P_z) resulta em dois valores de *Roll* e *Pitch* possíveis e adequados na prática. Portanto o estudo tem o objetivo de fornecer a função:

$$f(Px, Py, Pz) = (Roll, Pitch) \quad (4.22)$$

Para a medição de X e Y foi utilizado uma ferramenta com um laser, fixado no *Cardan* no centro da plataforma. Esta ferramenta (Figura 4.14) facilitou essa mesma leitura pois como o laser apontava sempre diretamente no sentido gravítico (graças ao *Cardan*), a leitura do X e Y pôde ser feita no tampo inferior da estrutura com uma simples régua milimétrica.



Figura 4.14 - Ferramenta *laser*

Para a leitura da coordenada Z do ponto P , foi usado um esquadro para garantir que a medição fosse feita a partir do tampo inferior da estrutura até ao centro da plataforma, fosse realizada sempre na vertical para minimizar o erro.

Para o exame da orientação da plataforma, ou seja, ângulos *Roll* e *Pitch* foi usado um dispositivo eletrónico capaz de disponibilizar os valores dos dois ângulos, em tempo real. Este dispositivo (Figura 4.15) é um IMU (*inertial measurement unit*) que contém inserido uma

combinação de giroscópios e acelerômetros capazes de reportar medidas como velocidade, orientação e forças gravitacionais. Por conveniência foi somente utilizada a capacidade de medir a orientação, concretamente os ângulos *Roll* e *Pitch*, já que *Yaw* se mantém zero. Para isso foi realizado um pequeno programa em C++ que permitia comunicar com o IMU e fazê-lo reportar a leitura de *Roll* e *Pitch* ciclicamente.

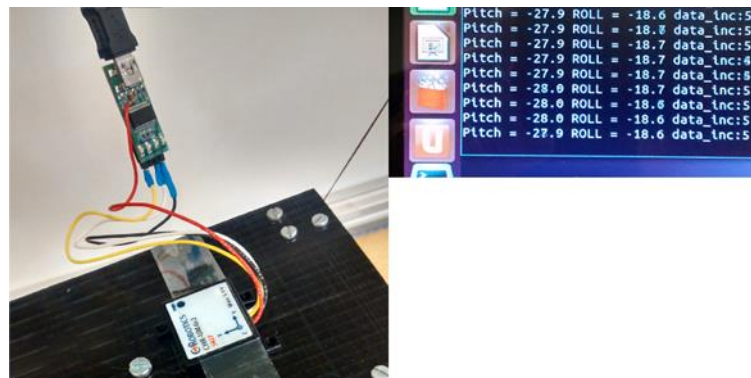


Figura 4.15 - IMU

Para a medição dos comprimentos dos cabos (L_1 , L_2 , L_3 , L_4) foram usados os *encoders* que se encontram nos enroladores dos servo motores. A contagem dos pontos/impulsos de cada *encoder* corresponde a um determinado comprimento de cabo. Para fazer essa conversão basta multiplicar por um fator que depende do número de impulsos que o *encoder* fornece por volta (40), e do raio do enrolador (2 centímetros). Esse fator multiplicativo é 31,469, ou seja, cada centímetros de cabo corresponde a 31,469 pontos de *encoder*.

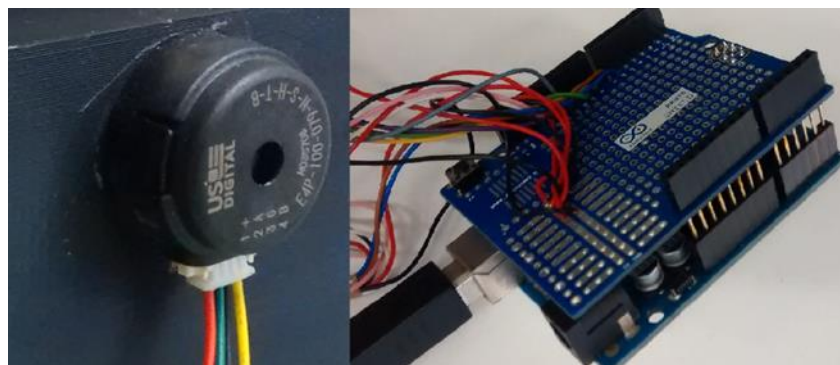


Figura 4.16 - Encoder / Arduino

I Estudo - Parte I - Roll (eixo XX)

Antes de mais começou-se por realizar um primeiro estudo do *Roll* e *Pitch* da plataforma fazendo esta deslocar-se em X e em Y , respetivamente. *Roll* e *Pitch* foram estudados isoladamente um do outro. Para determinar a rotação *Roll*, deslocou-se a plataforma em direção coincidente do eixo do XX . O ponto de partida é igual ao ponto central do plano XY da estrutura ($X=60$ e $Y=30$) com a plataforma plana em relação ao plano XY , ou seja, $Roll = 0$ e $Pitch = 0$. O estudo fez-se para várias alturas iniciais. O deslocamento da plataforma foi faseada em partes, de modo a que se pudesse apontar todos os valores pertinentes: X , Y , Z , $L1$, $L2$, $L3$, $L4$, *Roll* e *Pitch*. Esse deslocamento da plataforma foi provocado pelo aumento e redução do comprimento de certos cabos. Neste caso, foram aumentados os cabos 1 e 4, e reduzidos os cabos 2 e 3, em 6,4 centímetros. Cada parte do estudo considera-se finalizada quando a plataforma chega a uma das extremidades da estrutura (o que não é possível acontecer neste robô), quando se atinge o limite de elasticidade de algum cabo (o cabo quebrar-se devido ao excesso de tensão) ou quando se verifica que uma das inclinações *Roll* ou *Pitch* atingiu 45° (limitação mecânica do *Cardan*).

A Tabela 1 representa os pontos medidos deste primeiro estudo relativo ao *Roll*. Para este estudo foi considerado outro referencial Cartesiano. A origem do referencial está no centro da estrutura no plano XY e a origem da coordenada Z encontra-se no tampo inferior. As unidades dos valores de X , Y , Z , $L1$, $L2$, $L3$ e $L4$, são em centímetros e as unidades dos valores de *Roll* e *Pitch* são em graus.

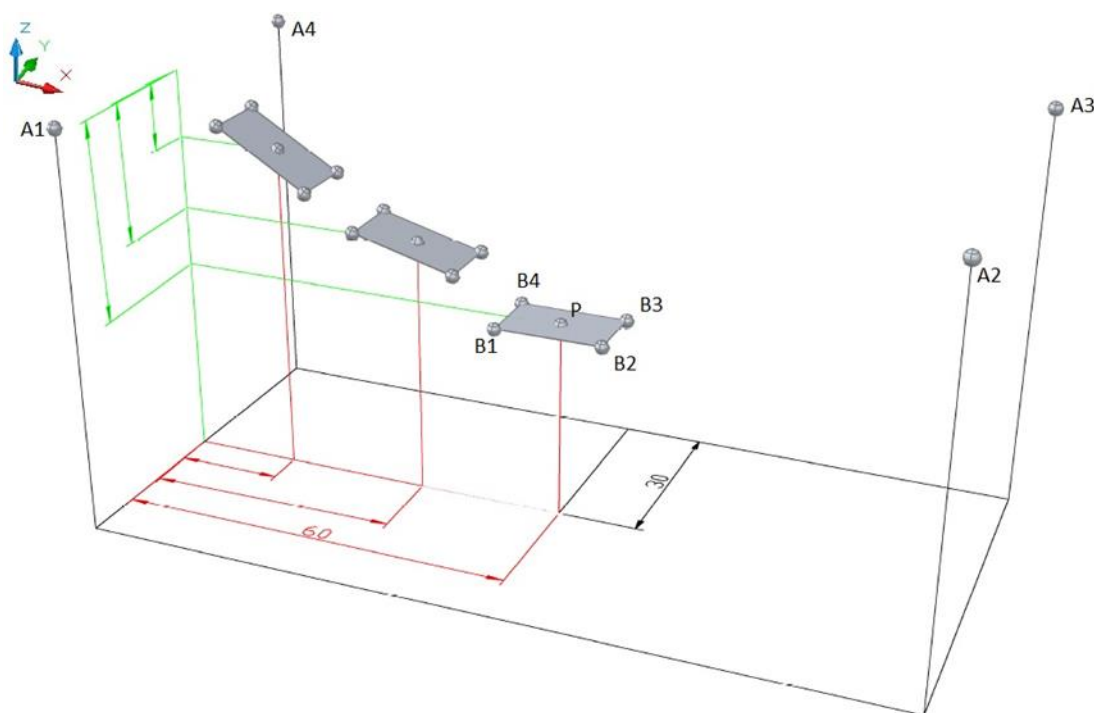


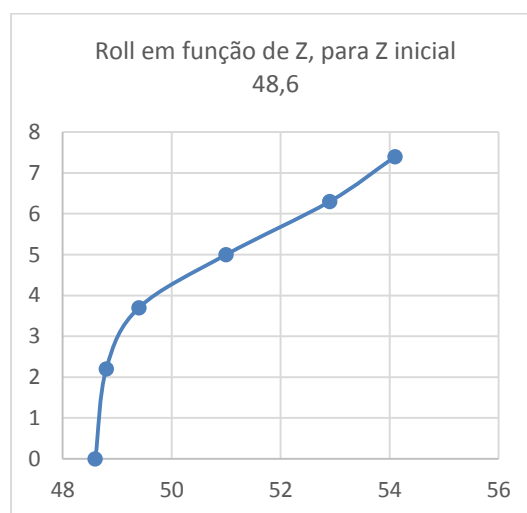
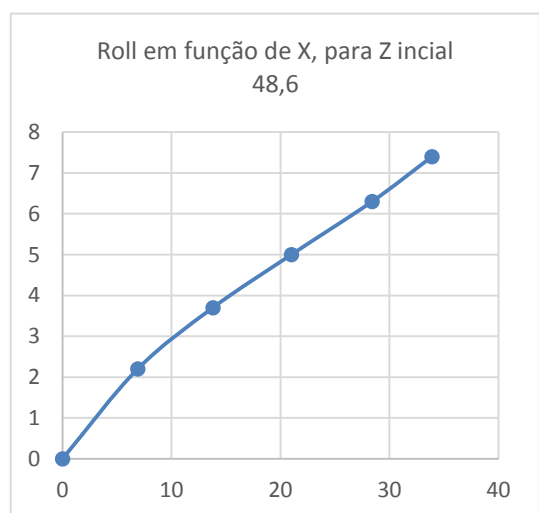
Figura 4.17 - I Estudo - Parte I

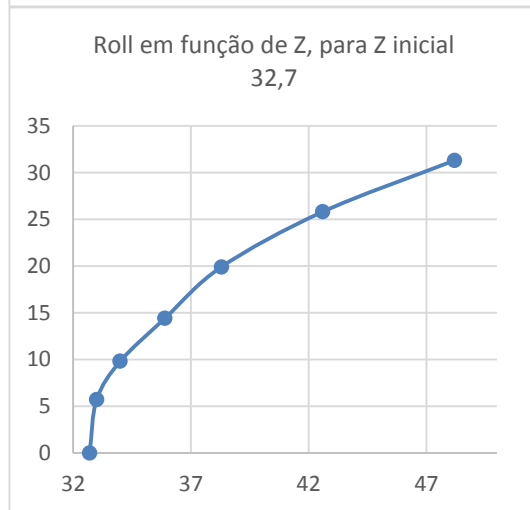
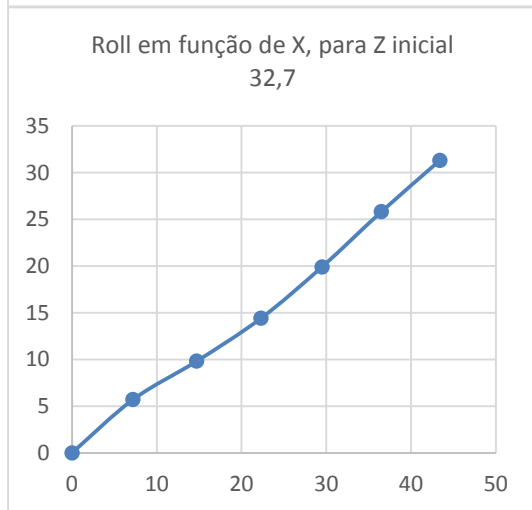
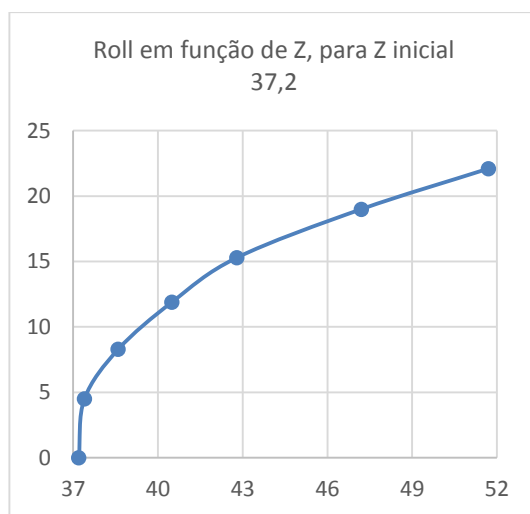
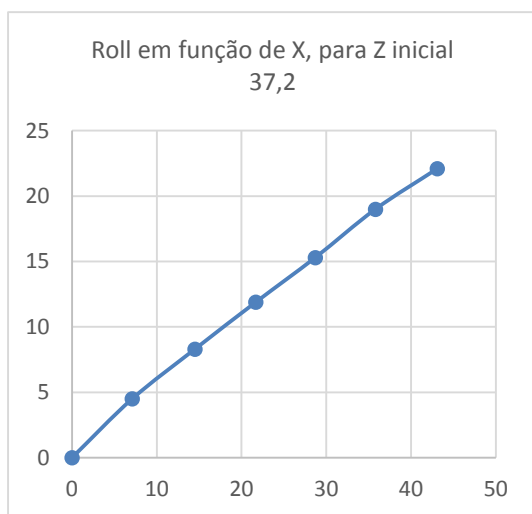
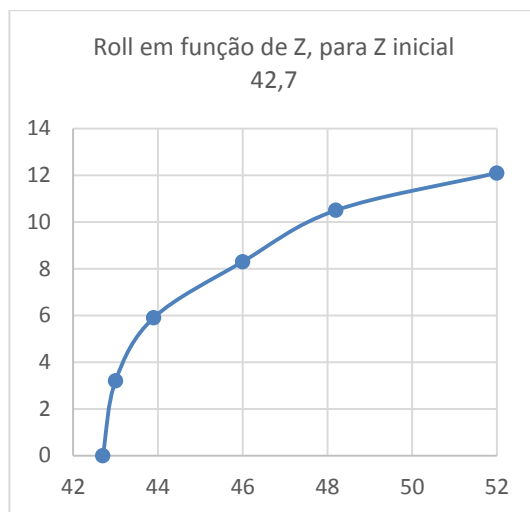
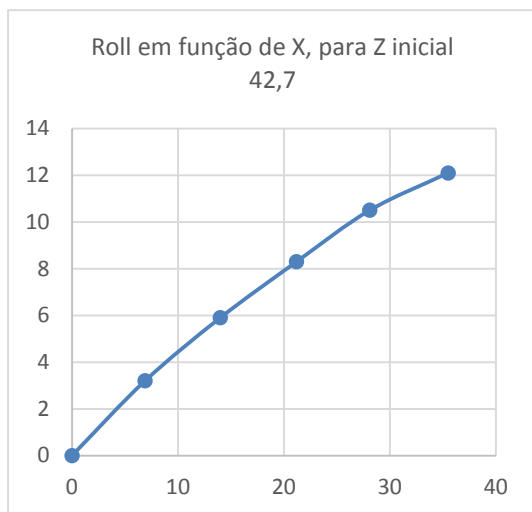
Tabela 4.1 - Dados I Estudo - Parte I

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,0	0,0	48,6	0,0	50,5	0,0	50,5	0,0	50,5	0,0	50,5	0,4	-0,3
6,9	0,0	48,5	193,0	56,6	-198,0	44,2	-207,0	43,9	202,0	56,9	2,2	-0,1
13,8	0,0	49,4	392,0	63,0	-400,0	37,8	-403,0	37,7	401,0	63,2	3,7	-0,5
21,0	-0,3	51,0	592,0	69,3	-596,0	31,6	-607,0	31,2	600,0	69,6	5,0	-0,2
28,4	-0,3	52,9	792,0	75,7	-794,0	25,3	-803,0	25,0	801,0	76,0	6,3	-0,5
33,9	0,0	54,1	930,0	80,1	-935,0	20,8	-935,0	20,8	935,0	80,2	7,4	-0,7
...

*a Tabela 4.1 completa encontra-se no Anexo A.

Para melhor interpretação destes valores os gráficos seguintes ajudarão a ter uma melhor análise dos dados da Tabela 1. Os gráficos seguintes que se encontram à esquerda da página correspondem à evolução de *Roll* em função de *X* para as várias alturas iniciais. Os gráficos seguintes à direita da página correspondem à evolução de *Roll* em função de *Z*. Em todos os gráficos seguintes o eixo das abscissas é composto por unidades em centímetros e o eixo das ordenadas em graus (geométricos).





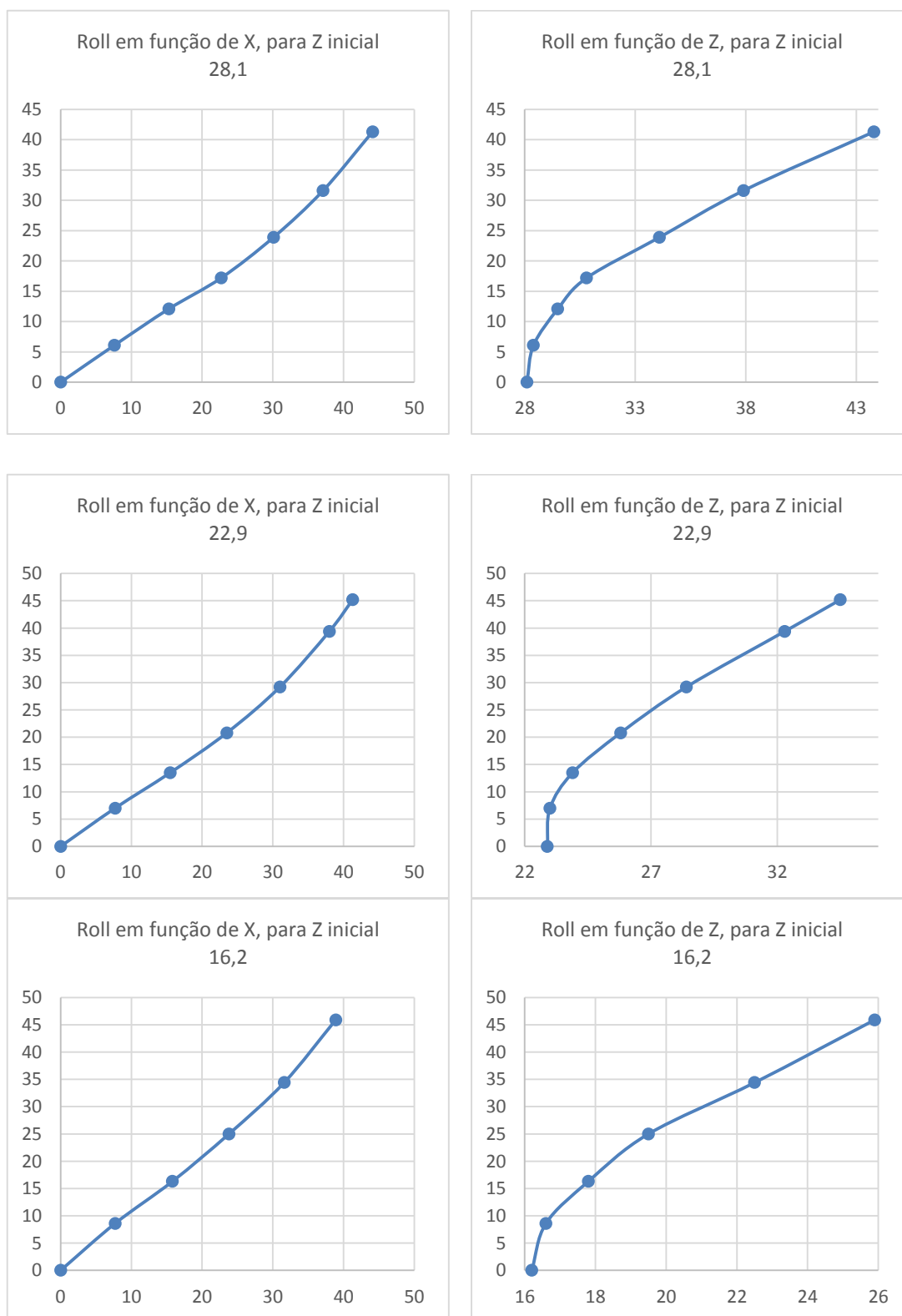


Figura 4.18 - Gráficos I Estudo - Parte I

I Estudo - Parte II - *Pitch* (eixo YY)

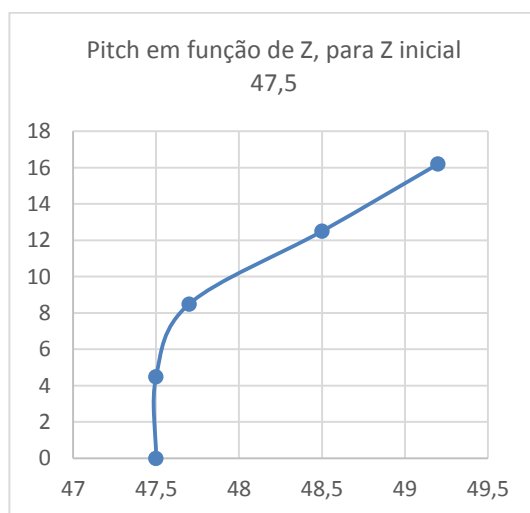
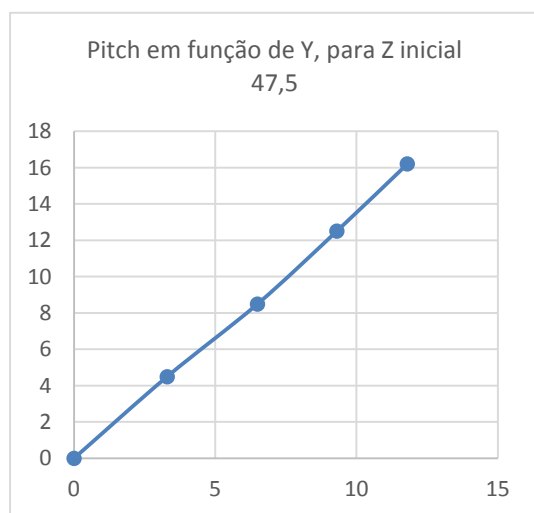
A Tabela 4.2 corresponde à segunda parte deste estudo. Assenta nas mesmas bases e conceitos do anterior mas é referente à inclinação *Pitch*, ou seja, no eixo dos YY.

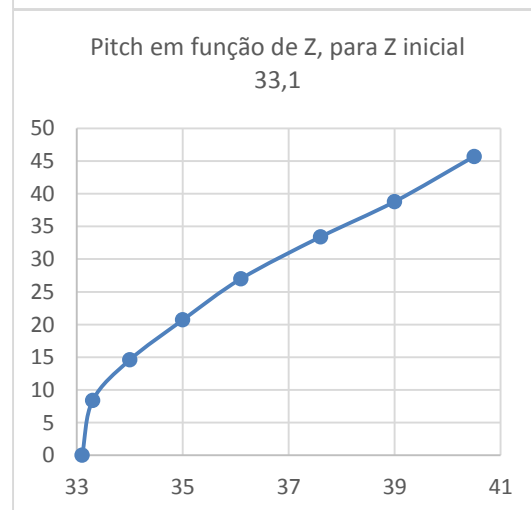
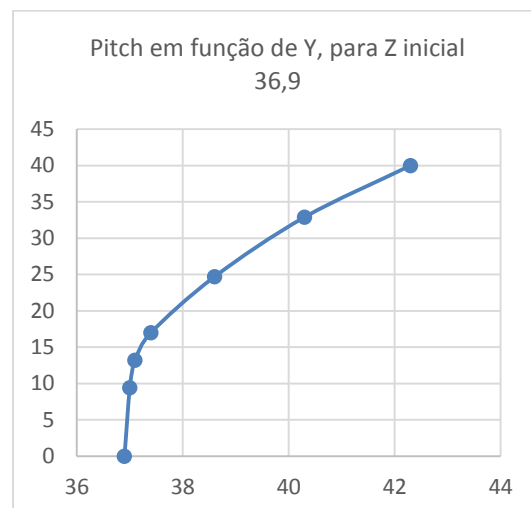
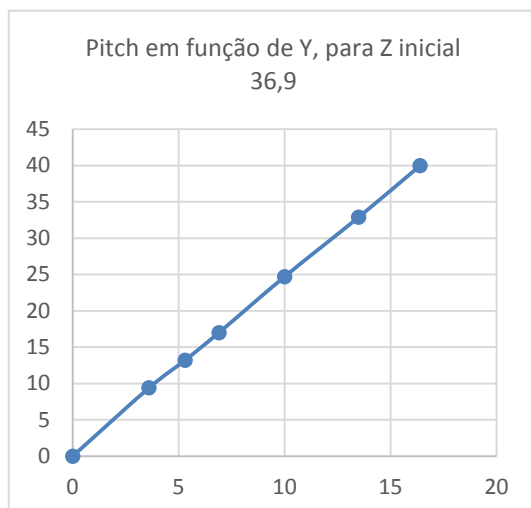
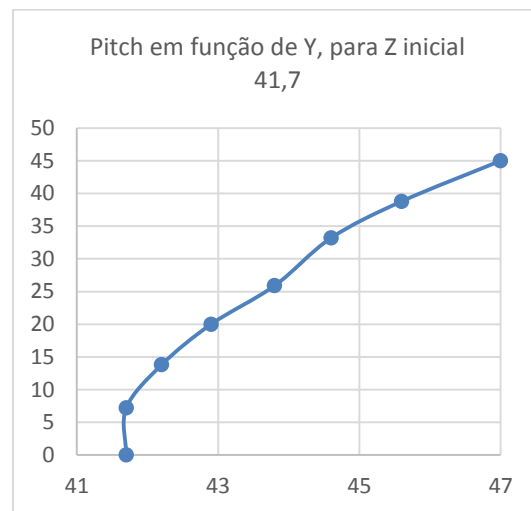
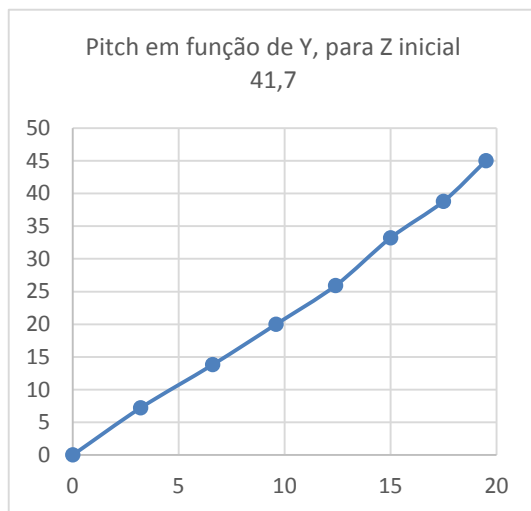
Tabela 4.2 - Dados I Estudo - Parte II

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,0	0,0	47,7	0,0	50,5	0,0	50,5	0,0	50,5	0,0	50,5	-0,6	0,4
0,0	3,3	47,7	57,0	52,3	46,0	52,0	-46,0	49,0	-51,0	48,9	-0,3	4,5
0,0	6,5	47,7	106,0	53,9	97,0	53,6	-88,0	47,7	-100,0	47,3	-0,4	8,5
0,0	9,3	48,9	155,0	55,4	145,0	55,1	-155,0	45,6	-146,0	45,9	-0,2	12,5
0,1	11,8	49,2	207,0	57,1	196,0	56,7	-199,0	44,2	-192,0	44,4	-0,1	16,2
...

*a Tabela 4.2 completa encontra-se no Anexo A.

À semelhança do caso anterior, os gráficos seguintes que se encontram à esquerda da página correspondem à evolução de *Pitch* em função de Y para as várias alturas iniciais. Os gráficos seguintes à direita da página correspondem à evolução de *Pitch* em função de Z. Em todos os gráficos seguintes o eixo das abcissas é composto por unidades em centímetros e o eixo das ordenadas em graus (geométricos).





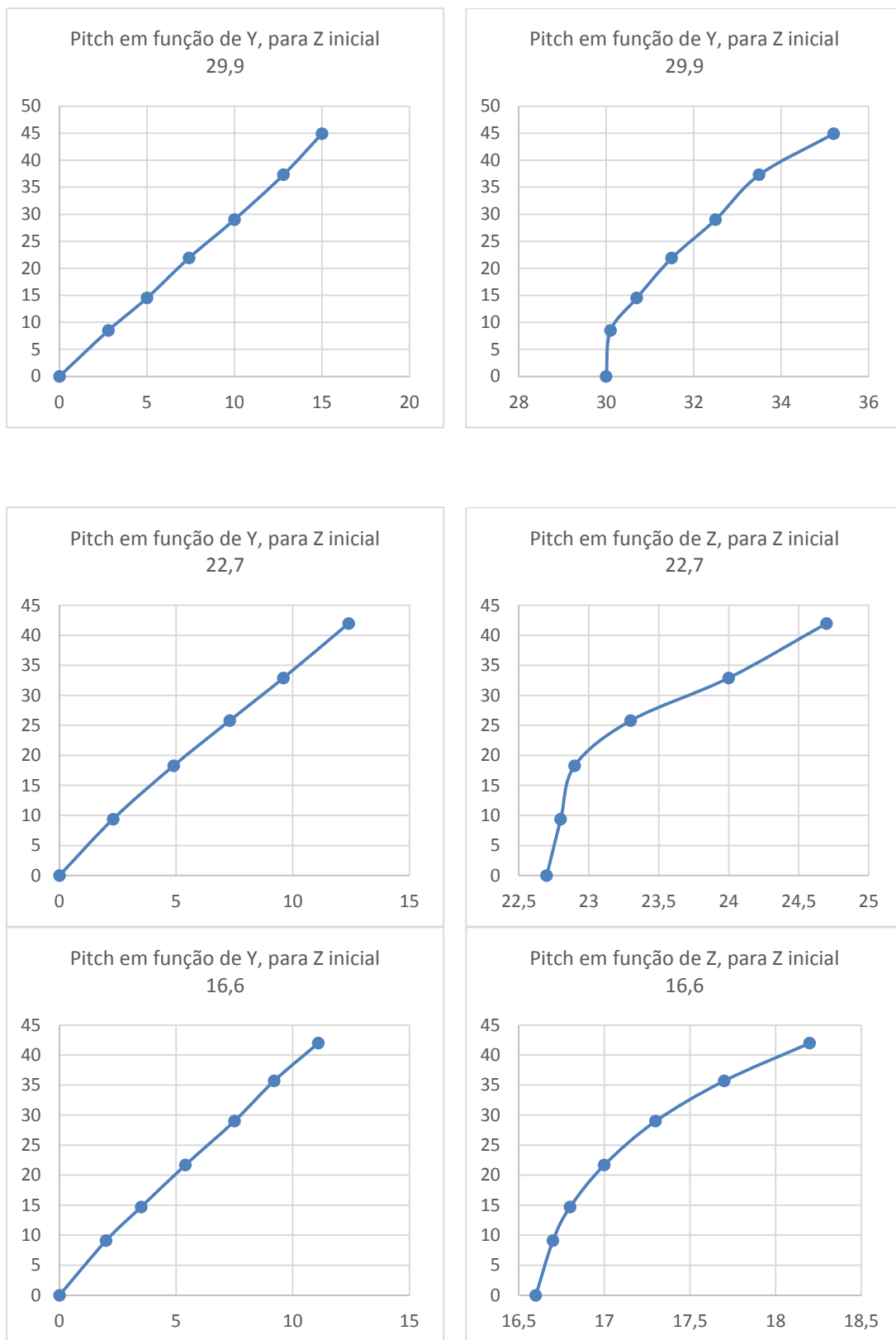


Figura 4.19 - I Estudo - Parte II

II Estudo - Parte I - *Roll e Pitch* combinados (1º Quadrante)

Após a realização do primeiro estudo, foi percebido que as funções adquiridas não são de natureza linear, assemelhando-se, aproximadamente, a funções de segundo grau. Concluiu-se que o primeiro estudo não bastava e que se teria de ir além dos eixos dos XX e dos YY .

Para além dos eixos dos XX e dos YY , o robô precisa de cobrir toda aquela área, ainda não estudada, fora desses eixos. Foi então realizado um segundo estudo que, tal como o anterior, consiste em retirar medições em pontos estratégicos e de interesse. Como o robô é simétrico para as direções $+X$ e $-X$, e $-Y$ e $+Y$, basta analisar o primeiro quadrante ($X > 0$ e $Y > 0$) e depois “espelhar” para os outros quadrantes, porque o comportamento nos restantes quadrantes espera-se que seja simétrico ao primeiro.

Este estudo foi mais específico e focado quando comparado com o anterior. Foram ignorados os comprimentos dos cabos, isto é, deixou de ser objeto de estudo, pois estas variáveis não necessitam de entrar na função resultante deste exame. Foi também isolada a variável que corresponde à coordenada Z , isto é, foi mantida a altura ao longo do deslocamento.

O estudo consistiu em fazer deslocar a plataforma numa diagonal (neste caso na diagonal do primeiro quadrante) em espaçamentos uniformes. Em cada ponto foram apontadas todas as variáveis de interesse: X , Y , *Roll* e *Pitch*; através de medições semelhantes ao anterior estudo. Este procedimento foi repetido para várias alturas (vários valores constantes de Z).

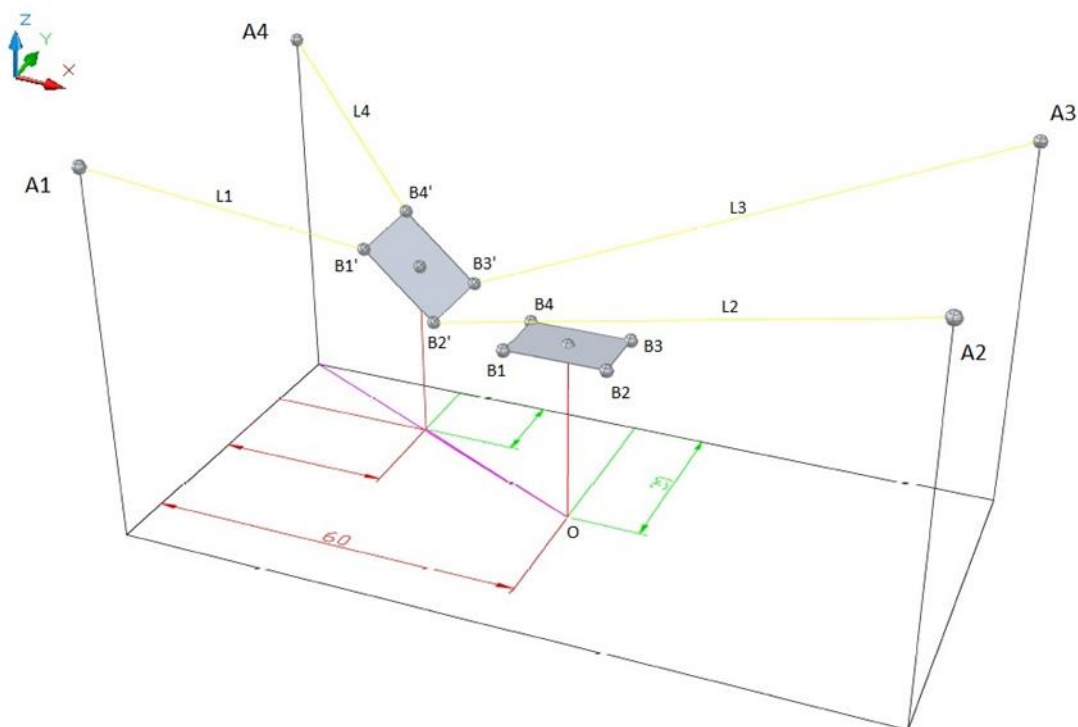


Figura 4.20 - Representação II Estudo - Parte I

A Tabela 4.3 representa os pontos medidos deste segundo estudo relativo à combinação de *Roll* e *Pitch*. As unidades dos valores de d , X , Y e Z são centímetros e as unidades dos valores de *Roll* e *Pitch* são em graus.

Tabela 4.3 - Dados II Estudo - Parte I

d^*	X	Y	Z	Roll	Pitch
0,0	0,0	0,0	17,9	0,0	0,0
3,0	2,7	1,3	17,9	2,7	6,2
6,0	5,4	2,7	17,9	4,3	10,7
9,0	8,0	4,0	17,9	6,0	13,0
12,0	10,7	5,4	17,9	7,8	16,0
15,0	13,4	6,7	17,9	9,8	20,2
18,0	16,1	8,1	17,9	13,4	24,1
21,0	18,8	9,4	17,9	15,9	27,5
24,0	21,5	10,7	17,9	18,5	30,5
27,0	24,1	12,1	17,9	22,1	33,4
30,0	26,8	13,4	17,9	27,9	37,1
33,0	29,5	14,8	17,9	35,5	40,6
...

*a variável “ d ” que se encontra na primeira coluna da Tabela 3 corresponde a $\sqrt{x^2 + y^2}$.

**a Tabela 4.3 completa encontra-se no Anexo A.

Mais uma vez, os gráficos seguintes servem para ilustrar e interpretar melhor os dados da tabela de valores medidos, neste caso da Tabela 3. Como a coordenada Z da plataforma foi

mantido ao longo de cada parte constituinte do estudo, é possível desenvolver gráficos (e consequente função) muito mais simples e de fácil interpretação.

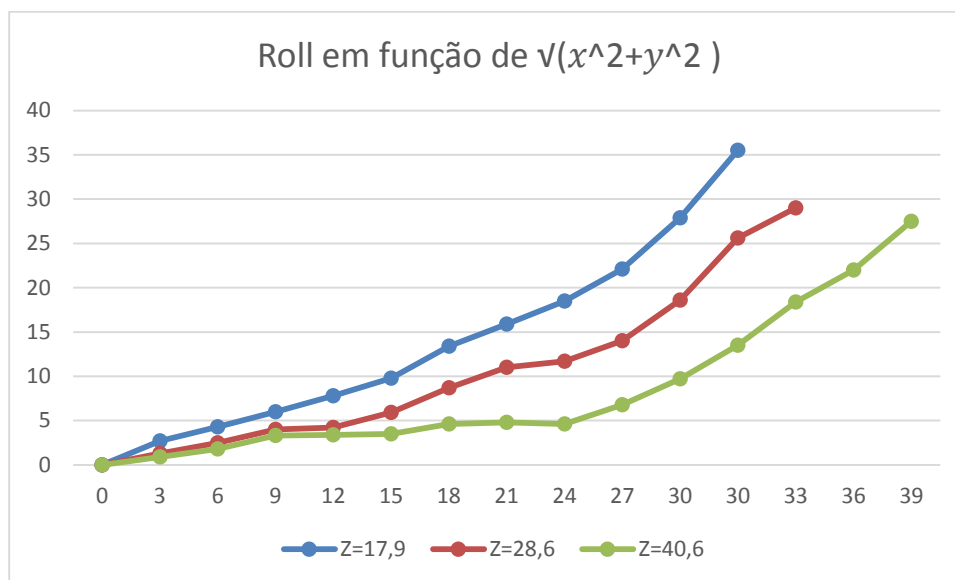


Figura 4.21 - Gráfico II Estudo - Parte I - Roll

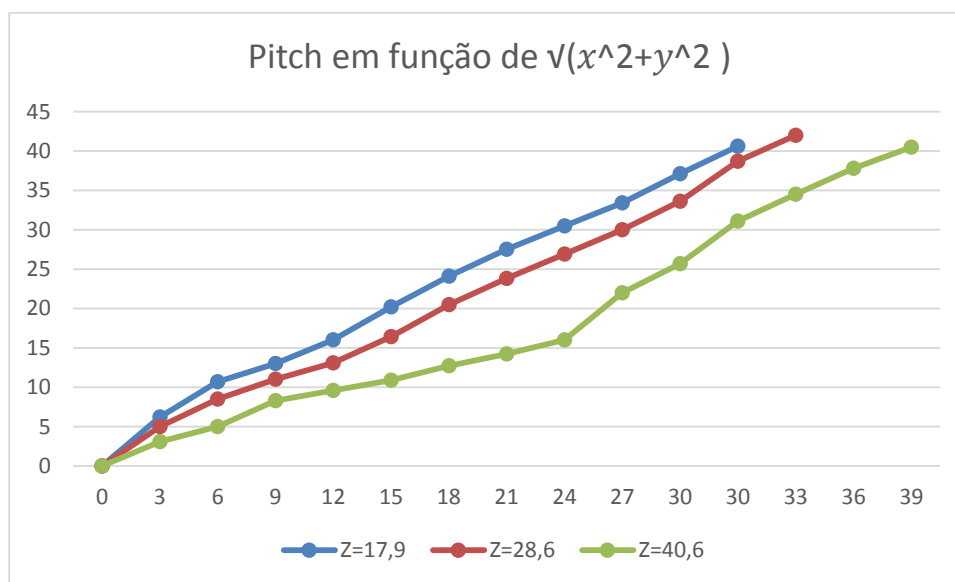


Figura 4.22 - Gráfico II Estudo - Parte I - Pitch

II Estudo - Parte II - Roll

Por questões de uniformidade do estudo, foi ainda realizado um estudo, com semelhanças com o primeiro estudo mas adaptado ao segundo. Isto é, foram elaboradas um conjunto de medições tanto no eixo dos XX como no eixo dos YY, separadamente, mas desta vez mantendo-

se a altura da plataforma (coordenada Z do ponto P) ao longo de cada deslocamento do estudo. As escolhas das alturas e passos em X e Y do estudo anterior foram as mesmas.

Tabela 4.4 - Dados II Estudo - Parte II

X	Y	Z	Roll	Pitch
0,0	0,0	18,1	0,0	0,0
3,0	0,0	18,1	3,3	0,0
6,0	0,0	18,1	6,1	0,0
9,0	0,0	18,1	9,0	0,0
12,0	0,0	18,1	12,0	0,0
15,0	0,0	18,1	15,0	0,0
18,0	0,0	18,1	18,1	0,0
21,0	0,0	18,1	21,8	0,0
24,0	0,0	18,1	25,7	0,0
27,0	0,0	18,1	29,5	0,0
30,0	0,0	18,1	34,1	0,0
...

*a Tabela 4.4 completa encontra-se no Anexo A.

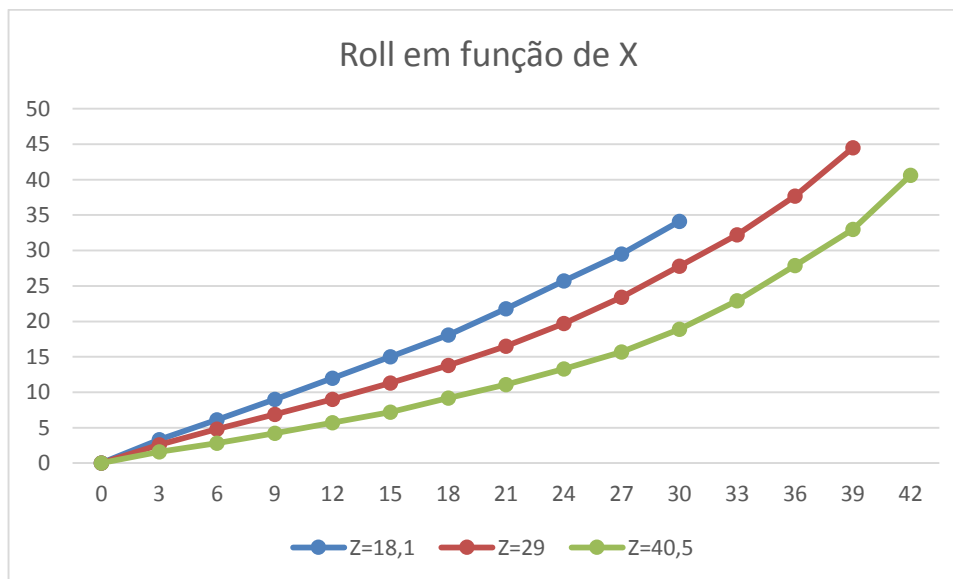


Figura 4.23 - Gráfico II Estudo - Parte II

II Estudo - Parte III - Pitch

Tabela 4.5 - Dados II Estudo - Parte III

X	Y	Z	Roll	Pitch
0,0	0,0	18,0	0,0	0,0
0,0	3,0	18,0	0,0	12,4
0,0	6,0	18,0	0,0	23,2
0,0	9,0	18,0	0,0	34,9
0,0	12,0	18,0	0,0	45,8
...

*a Tabela 4.5 completa encontra-se no Anexo A.

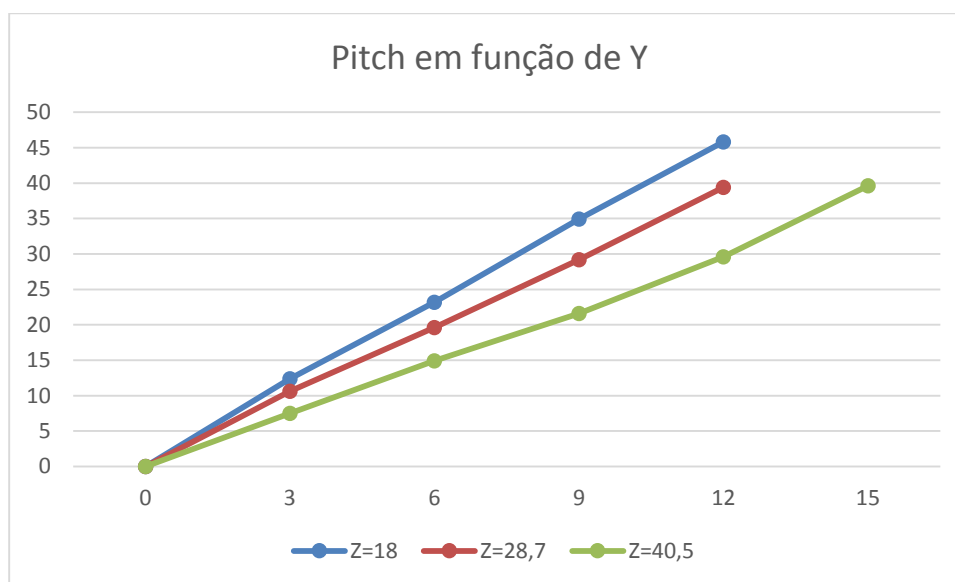


Figura 4.24 - Gráfico II Estudo - Parte III

Interpretações dos dados

Depois dos 190 pontos de medição passou-se à interpretação e utilização dos mesmos.

O primeiro estudo revelou-se pouco apropriado para uma fácil apreciação do comportamento da plataforma ao longo do volume de trabalho do robô. Isto deve-se à quantidade excessiva de variáveis a tratar no estudo, ou seja:

$$Roll = f(X, Z) \quad ; \quad Pitch = f(Y, Z)$$

(4.23)

Mesmo assim é possível retirar algumas ilações. Com o aumento de X ou de Y , o ângulo *Roll* e *Pitch*, isoladamente, aumentam quase linearmente. Isto deve-se ao facto da variação dos comprimentos dos cabos serem, em valor absoluto, todas iguais. As rotações *Roll* e *Pitch* variam o posicionamento das extremidades da plataforma em relação ao seu centro e como os ângulos de “ataque” dos cabos (direção) variam em relação à posição da plataforma, naturalmente o ponto P da plataforma irá subir com um passo variável em relação às distâncias trigonométricas que se apresentam.

O segundo estudo visou a eliminação da variação de Z e a análise das variáveis que realmente importam, combinando as duas inclinações, *Roll* e *Pitch*. Essas variáveis são X , Y , *Roll* e *Pitch*. Este estudo revelou-se mais simples aquando da análise de dados.

$$Roll = f(X), \quad Z = 18 \cup Z = 29 \cup Z = 41 \quad (4.24)$$

$$Pitch = f(Y), \quad Z = 18 \cup Z = 29 \cup Z = 41 \quad (4.25)$$

Segundo os gráficos das Equações 4.24 e 4.25 são, aproximadamente, quadráticas, ou seja, as funções de *Roll* e *Pitch* em relação a X e Y , respetivamente, são de ordem 2.

Após os estudos, aprendeu-se que os ângulos *Roll* e *Pitch* evoluem positivamente conforme o distanciamento do centro do plano XY , e essa evolução é mais significativa quanto menor for Z .

4.2.2 - Tratamento de dados do estudo das inclinações

Para completar a cinemática inversa do robô, desenvolvida em 4.1, é necessário desenvolver duas equações que devolvam um valor para *Roll* e *Pitch*, respetivamente, em função do ponto P . Como já foi mencionado as coordenadas do ponto P (P_x , P_y e P_z) são as únicas que o sistema precisa para calcular os comprimentos dos cabos e levar a plataforma para o destino pretendido, isto do ponto de vista do utilizador (entrada do sistema). No entanto o sistema de controlo terá de fazer alguns cálculos intermédios para determinar um valor para *Roll* e *Pitch*, pois também são constituintes do grupo dos graus de liberdade, apesar de, devido ao *Cardan* ser praticamente indiferente a orientação que a plataforma toma num determinado ponto, desde que o ponto P se encontre na posição pretendida.

Para a reprodução de uma equação geral que devolva *Roll* e outra que resulte em *Pitch* foi usado o método dos Mínimos Quadrados.

Método dos Mínimos Quadrados

O método Mínimos Quadrados é frequentemente usado como abordagem de aproximação, para resolver sistemas de equações sobre determinadas ou imprecisas. Em vez de resolver as equações exatamente, o método visa minimizar a soma dos quadrados dos resíduos.

O critério do método dos Mínimos Quadrados comporta importantes interpretações estatísticas. Se as suposições probabilísticas que são tomadas acerca das distribuições de erros subjacentes são apropriadas, o método dos Mínimos Quadrados produz aquilo que é conhecido como a estimativa de máxima verosimilhança dos parâmetros. Mesmo se as suposições probabilísticas não forem satisfatórias, diversas aplicações mostram que o método produz resultados úteis [38].

Este método é então adequado para se achar as equações aproximadas para o *Roll* e para *Pitch*. Para isso o método usa técnicas de aproximação que permite, neste caso, descrever curvas e superfícies de tendência, pois os dados retirados dos estudos das inclinações são medições discretas. Torna-se então necessário fazer a aproximação entre pontos e a interpolação entre diferentes alturas.

Analisando os gráficos dos estudos do *Roll* e do *Pitch*, conclui-se que a evolução destes dois ângulos comporta, no máximo, funções quadráticas ao longo do volume de trabalho. Portanto as variáveis de interesse (*X*, *Y* e *Z*) têm componentes de ordem 2 quando calculadas no método dos Mínimos Quadrados, como é possível ler-se na equação (4.26).

O método será aplicado duas vezes, uma para se obter uma função que determine *Roll* e outra *Pitch*.

$$\mathbf{A} = a.x^2 + b.x + c.y^2 + d.y + e.z^2 + f.z + g.xy + h.xz + i.yz + j \quad (4.26)$$

$$[\mathbf{A}] = [\mathbf{Q}][\boldsymbol{\sigma}] \quad (4.27)$$

$$[\mathbf{A}_i] = \begin{bmatrix} x_i^2 & x_i & y_i^2 & y_i & z_i^2 & z_i & xy_i & xz_i & yz_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \\ i \\ j \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.28)$$

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & y_1^2 & y_1 & z_1^2 & z_1 & xy_1 & xz_1 & yz_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n & y_n^2 & y_n & z_n^2 & z_n & xy_n & xz_n & yz_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \\ i \\ j \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$[\sigma] = ([Q]^T[Q])^{-1}[Q]^T[A] \quad (4.30)$$

De notar as correspondências nas equações seguintes:

A - função objetivo, ou seja, *Roll* ou *Pitch*;

a, b, c, d, e, f, g, h, i e j - coeficientes multiplicativos que constituem a função objetivo (que irão ser determinados com o resultado do método);

[A] - matriz $n \times 1$ de n valores de *Roll* ou *Pitch* das n leituras realizadas nos estudos das inclinações da plataforma;

[Q] - matriz $n \times 10$ que contém as variáveis do sistema com todas as suas combinações multiplicativas até ao segundo grau. Essas variáveis correspondem aos valores obtidos das n leituras dos estudos das inclinações da plataforma;

[σ] - matriz 10×1 dos valores dos coeficientes *a, b, c, d, e, f, g, h, i e j*;

Para o cálculo dos coeficientes da matriz σ utilizou-se o *software* MATLAB da MathWorks. Este *software* é muito versátil e útil na hora de produzir cálculos complexos e tem a capacidade de manipular matrizes.

Foram então introduzidas as seguintes linhas de código na linha de comandos:

```
>>x = xlsread('leituras.xls','Folha1','A2:A191');
>>y = xlsread('leituras.xls','Folha1','B2:B191');
>>z = xlsread('leituras.xls','Folha1','C2:C191');
>>roll = xlsread('leituras.xls','Folha1','D2:D191');
>>pitch = xlsread('leituras.xls','Folha1','E2:E191');
>>Q = [x.^2 x y.^2 y z.^2 z x.*y x.*z y.*z ones(190,1)];
>>Ans_roll=inv((Q'*Q))*Q'*roll
>>Ans_pitch=inv((Q'*Q))*Q'*pitch"
```

*Notas:

1. a função do MATLAB "xlsread" é utilizada para importar os valores do ficheiro "leituras.xls";
2. a tabela que se encontra na "Folha1" no ficheiro "leituras.xls" corresponde à combinação das Tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

Das quais resultaram:

```
>>Ans_roll =
>> 0.0199
```



```

>> 1.0679
>> 0.0233
>> -0.2952
>> -0.0033
>> 0.2296
>> -0.0074
>> -0.0261
>> -0.0033
>> -2.4112
>>Ans_pitch =
>> 0.0018
>> -0.3007
>> 0.0491
>> 4.0386
>> -0.0055
>> 0.2470
>> -0.0203
>> 0.0061
>> -0.0550
>> -0.8819"

```

Conclui-se então que, com a introdução de todos os valores de todas as leituras realizadas nos estudos do Capítulo 4.2, as funções que o método dos Mínimos Quadrados forneceu são as seguintes:

$$\begin{aligned}
 Roll = f(x, y, z) = & 0,0199x^2 + 1,0679x + 0,0233y^2 - 0,2952y - 0,0033z^2 + 0,2296z \\
 & - 0,0074xy - 0,0261xz - 0,0033yz - 2,4112
 \end{aligned}
 \tag{4.31}$$

$$\begin{aligned}
 Pitch = f(x, y, z) \\
 = & 0,0018x^2 - 0,3007x + 0,0491y^2 + 4,0386y - 0,0055z^2 + 0,2470z - 0,0203xy \\
 & + 0,0061xz - 0,0550yz - 0,8819
 \end{aligned}
 \tag{4.32}$$

4.3 - Volume de Trabalho

Em aplicações práticas de qualquer manipulador é essencial saber-se a área ou volume de trabalho, de acordo com os graus de liberdade. Em contraste com os manipuladores convencionais, que utilizam ligações rígidas, o volume de trabalho de um robô de cabos não é limitado pela amplitude dos atuadores. Os comprimentos dos cabos não comportam um fator limitativo uma vez que os comprimentos dos cabos poderão assumir os valores que se pretenda. Embora os cabos não limitem o sistema, a capacidade do guincho terá de ser planeada de acordo com os requisitos.

O volume de trabalho de um robô de cabos é limitado, principalmente, pelo limiar de forças aplicadas nos cabos. Outros critérios têm de ser considerados aquando da análise da amplitude de trabalho, tais como rigidez e resistência mecânica dos cabos e partes integrantes do robô ou colisões entre cabos.

Antes de qualquer estudo ou cálculo para a determinação do volume de trabalho são previsíveis alguns conceitos básicos relativamente a este robô, em particular: os limites do volume de trabalho nunca ultrapassam, em boas condições de funcionamento, os limites da estrutura, excetuando uma superfície. Essa superfície é o tampo inferior (plano XY com $Z = 0$) da estrutura. Isto deve-se ao facto de que existe uma força, com direção e sentido constantes ($-Z$), presente em todos os momentos. A força gravitacional é a única força exercida na plataforma com sentido descendente, os cabos produzem componentes de forças com sentido $+Z$ e direções coincidentes com os eixos dos XX e dos YY .

Após o estudo da cinemática e inclinações da plataforma (Subcapítulos 4.1 e 4.2) é obtida uma percepção mais clara do comportamento da plataforma ao longo do interior da estrutura. É sabido que, em termos gerais, o ângulo *Roll* varia com a coordenada X e o ângulo *Pitch* com Y . A evolução destes dois ângulos é mais ou menos acentuada conforme a altura (coordenada Z) a que o deslocamento da plataforma é executado. Em consequência disso, a gama de pontos atingíveis aumenta em função da altura.

No caso particular deste robô de cabos, a principal limitação ao volume de trabalho é dado por propriedades mecânicas, mais especificamente pelos limites angulares do *Cardan*. Este componente mecânico, nesta aplicação, permite isolar a orientação da plataforma da orientação da ferramenta. Este isolamento dos ângulos dos corpos fixados nos dois extremos do *Cardan* só é eficaz até um limite de 40° (eixo do *Cardan*).

4.3.1 - Determinação do Volume de Trabalho

Para a determinação do volume de trabalho do robô de cabos a atenção foi debruçada na principal limitação, o *Cardan*. Assim cada inclinação que se apresente na plataforma (*Roll* e *Pitch*) não pode, individualmente, ultrapassar os 40° em relação ao plano XY .

Dos Subcapítulos 4.1 e 4.2:

$$\begin{aligned} Roll = & 0,0199x^2 + 1,0679x + 0,0233y^2 - 0,2952y - 0,0033z^2 + 0,2296z - 0,0074xy - 0,0261xz \\ & - 0,0033yz - 2,4112 \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} Pitch = & 0,0018x^2 - 0,3007x + 0,0491y^2 + 4,0386y - 0,0055z^2 + 0,2470z - 0,0203xy \\ & + 0,0061xz - 0,0550yz - 0,8819 \end{aligned} \quad (4.32)$$

Sabendo que *Roll* e *Pitch* não podem ultrapassar, em nenhum momento, os 40° , foram usadas as equações 4.31 e 4.32 (funções que definem as inclinações da plataforma) para fazer-se uma aproximação do volume de trabalho do sistema robótico.

Foram substituídos os valores de x , y e z das equações 4.31 e 4.32, dentro da gama de valores das linhas (de 1 a 6) da Figura 4.25. Isto foi realizado para três valores de z diferentes, $z = 0$, $z = 11$ e $z = 23$. O ponto de cada uma dessas linhas, cujo resultado (após substituição nas equações) de *Roll* ou de *Pitch* seja 40° , corresponde ao ponto limite que a plataforma pode deslocar-se na direção correspondente à linha. Assim obteve-se o ponto limite de cada uma das retas (de 1 a 6). Resultaram então 18 pontos da superfície do limite do volume de trabalho do primeiro quadrante.

Como o sistema é simétrico no plano XY desde o centro até às arestas da estrutura, os mesmos resultados podem ser espelhados para os restantes quadrantes. A Tabela 4.6 lista todos os pontos estudados correspondentes ao limite do volume de trabalho.

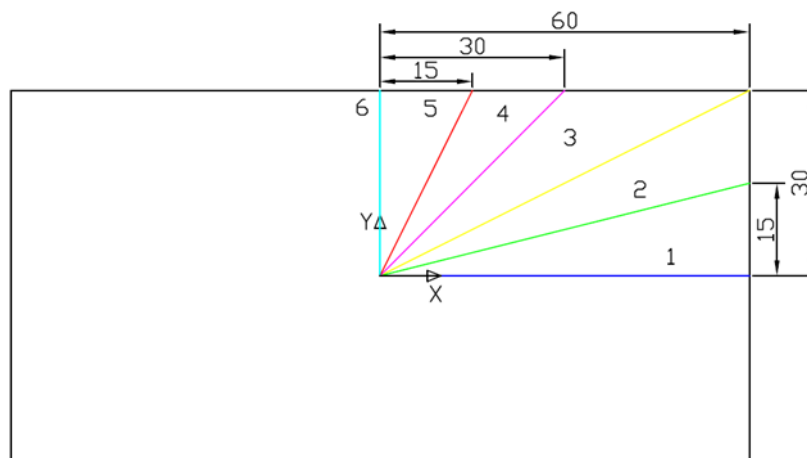


Figura 4.25 - Representação do método usado para determinação do volume de trabalho

Tabela 4.6 - Valores limites do volume de trabalho

Roll = 40 OU Pitch = 40				
Quadrante	Reta	X	Y	Z
1º	1	0	10,5	0
		0	12,5	11
		0	15,5	23
	2	34,44005	8,610061	0
		40,2609	10,06528	11
		48,02204	12,00558	23
	3	26,85504	13,37187	0
		31,77846	15,82339	11
		40,28255	20,05781	23
	4	12,37437	12,37437	0
		14,14214	14,14214	11
		16,97056	16,97056	23
	5	5,725323	11,44817	0
		6,530446	13,05807	11
		7,872319	15,74124	23
	6	32	0	0
		37	0	11
		44,5	0	23
...

*a Tabela 4.6 completa encontra-se no Anexo B.

Para a reprodução da superfície limite do volume de trabalho foi usado a ferramenta MATLAB, nomeadamente as suas funções *mesh()* e *surf()*.

Código MATLAB:

```
>>x = xlsread('limites.xls','Folha1','A1:A72');
>>y = xlsread('limites.xls','Folha1','B1:B72');
>>z = xlsread('limites.xls','Folha1','C1:C72');
>>dx=1;
>>dy=1;
>>x_edge=[floor(min(x)):dx:ceil(max(x))];
>>y_edge=[floor(min(y)):dy:ceil(max(y))];
>>[X,Y]=meshgrid(x_edge,y_edge);
>>Z=griddata(x,y,z,X,Y);
>>surf(X,Y,Z)
```

x, y e z são os valores da Tabela 4.6.

Das funções do programa em MATLAB resultaram as Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29.

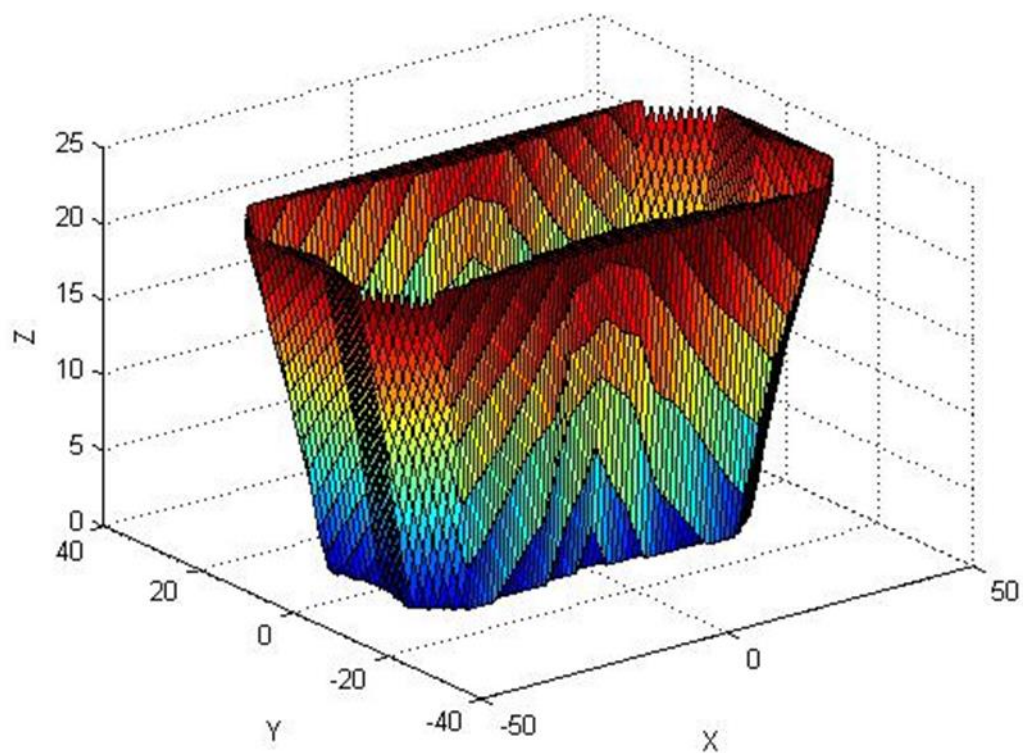


Figura 4.26 - Volume de trabalho 3D

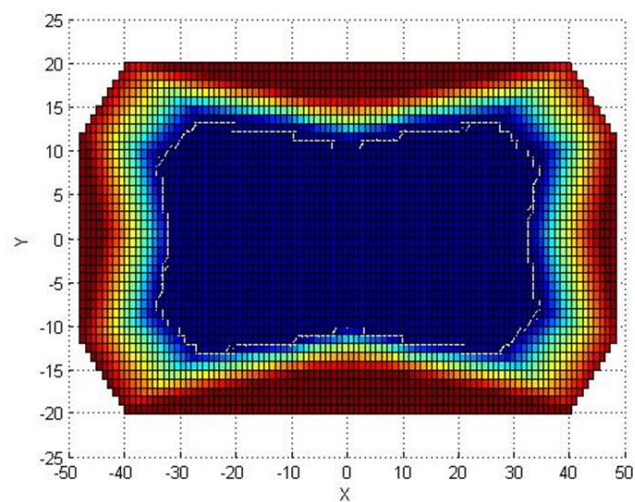


Figura 4.27 - Volume de trabalho XY

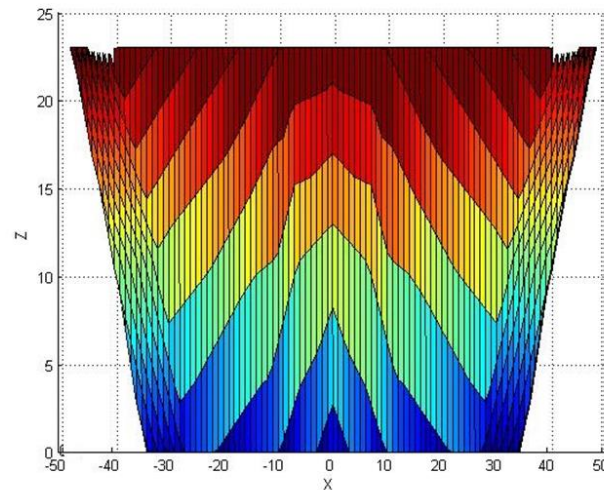


Figura 4.28 - Volume de Trabalho XZ

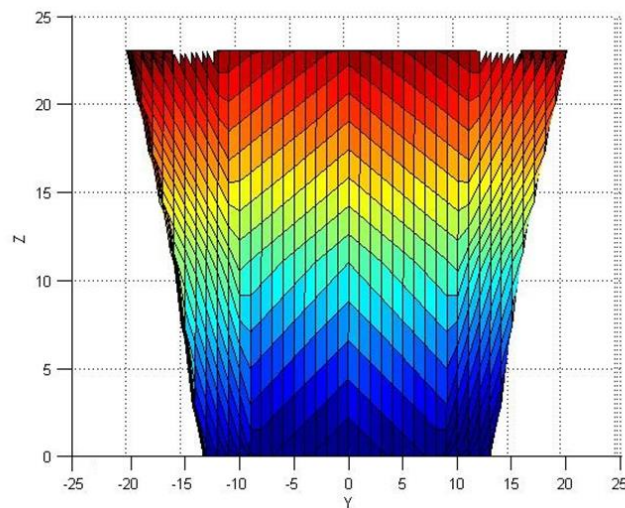


Figura 4.29 - Volume de trabalho YZ

O volume de trabalho deste robô possui semelhanças aos demais robôs de cabos, especialmente com aqueles que só contêm cabos acima do centro de massa da ferramenta. O volume de trabalho aumenta de baixo para cima e é sempre inferior ao volume da estrutura do robô. Devido às limitações e características de todos os componentes mecânicos deste protótipo (resistência dos materiais, elasticidade dos cabos, etc.), o volume de trabalho não é tão extenso quanto poderia ser em condições ideais. Mesmo assim obtiveram-se bons resultados em relação aos manipuladores clássicos e mesmo comparado com outros robôs de cabo

Capítulo 5

Implementação

5.1 - Trajetória e planeamento

A movimentação da plataforma e da ferramenta de um ponto para outro no espaço dentro do volume de trabalho (de acordo com as ordens dados pelo utilizador) não deve ser feita através de uma trajetória direta. O deslocamento deve comportar destinos e ordens intermédios.

Os destinos intermédios são determinantes para que a plataforma do robô não tome uma trajetória inconveniente a ponto de a ferramenta derrubar objetos que eventualmente possam estar pelo caminho, ou fazer uma abordagem errada ao objeto pretendido. A abordagem ao objeto deve ser feita sempre por cima. Entre duas ordens, o robô deve fazer com que a ferramenta suba diretamente (aumentar a coordenada Z) até ao ponto mais alto que o volume de trabalho permita ($Z = 24$ centímetros), depois mover-se até a posição de X e de Y de destino, e por fim descer até ao ponto desejado. De notar que a rotação da ferramenta e abertura da garra (caso a ordem seja para pegar no objeto) deve ser feita antes desta última descida. Se a ordem for para largar o objeto a rotação da ferramenta deve, igualmente, ser executada em cima do ponto desejado ($Z = 24$ centímetros) mas a abertura deve ser realizado no ponto desejado, depositando o objeto. A Figura 5.1 ilustra o reposicionamento de um objeto seguindo uma trajetória predefinida.

Para assegurar que a trajetória tomada seja a apropriada é desenvolvida uma lista com todas as ordens do utilizador juntamente com todos os pontos e ordens intermédias.

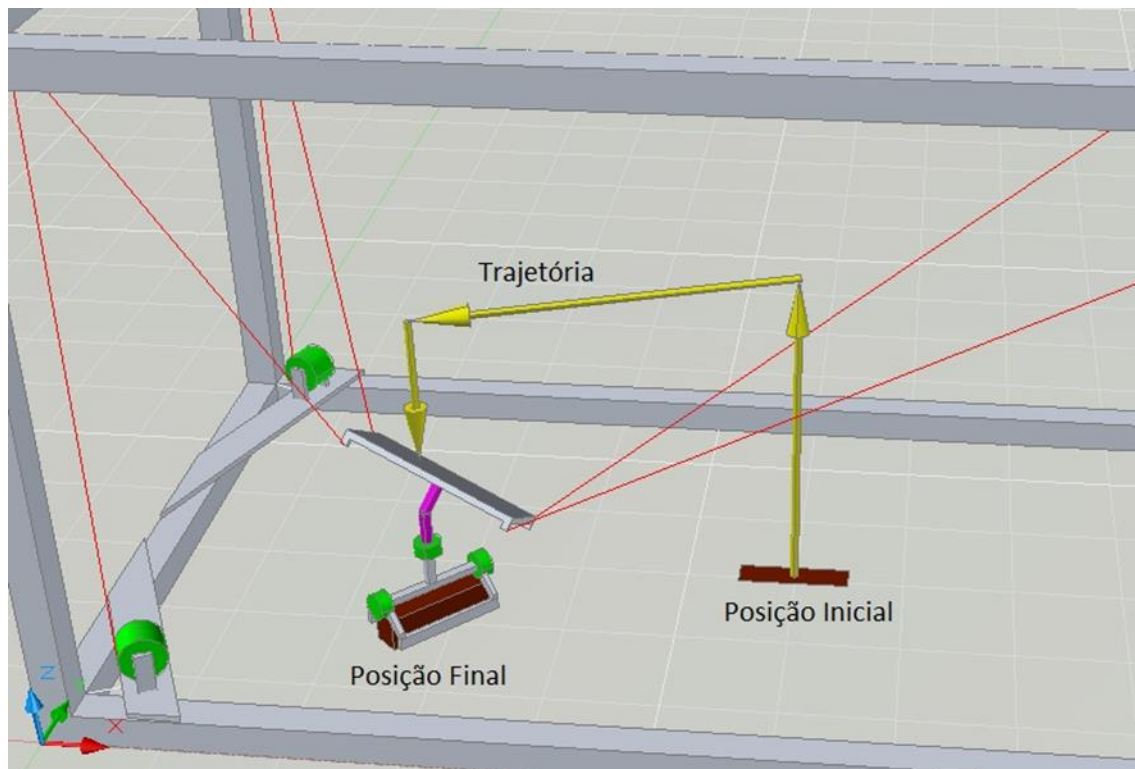


Figura 5.1 - Representação 3D da trajetória

Os destinos intermédios implicam movimentações da plataforma e ferramenta, resultando numa maior distância percorrida do que o deslocamento entre o ponto de partida e destino. A ordem de trabalhos é uma lista cujas linhas contêm todos os pontos e cada linha corresponde a um único ponto, com identificação dada pela variável i . A lista é então numerada de 1 a n pontos ($i = 1, \dots, n$). O tamanho da lista (n) é igual a três vezes o número de ordens do utilizador mais três. A soma desta constante deve-se ao fato de serem adicionadas ordens de modo a garantir que a plataforma se encontra na Origem quando finaliza um Trabalho. Assim no arranque do sistema ou quando é ordenado um novo trabalho a plataforma encontra-se numa posição conhecida.

Tabela 5.1 - Novo trabalho / ordem de Trabalhos

Novo Trabalho				
X	Y	Z	Garra	Rotação
20	10	10	Fechada	0
-10	12	0	Aberta	45
-30	-6	5	Fechada	90
8	-11	13	Aberta	135

Ordem de Trabalhos					
i	X	Y	Z	Garra	Rotação
1	0	0	24	Aberta	0
2	20	10	24	Aberta	0
3	20	10	10	Fechada	0
4	20	10	24	Fechada	0
5	-10	12	24	Fechada	45
6	-10	12	0	Aberta	45
7	-10	12	24	Aberta	45
8	-30	-6	24	Aberta	90
9	-30	-6	5	Fechada	90
10	-30	-6	24	Fechada	90
11	8	-11	24	Fechada	135
12	8	-11	13	Aberta	135
13	8	-11	24	Aberta	135
14	0	0	24	Aberta	0
15	0	0	4,5	Aberta	0

5.2 - Controlo

5.2.1 - Controlo das variáveis do sistema

O controlo das variáveis do sistema segue a evolução da máquina de estados finitos representada na Figura 5.2.

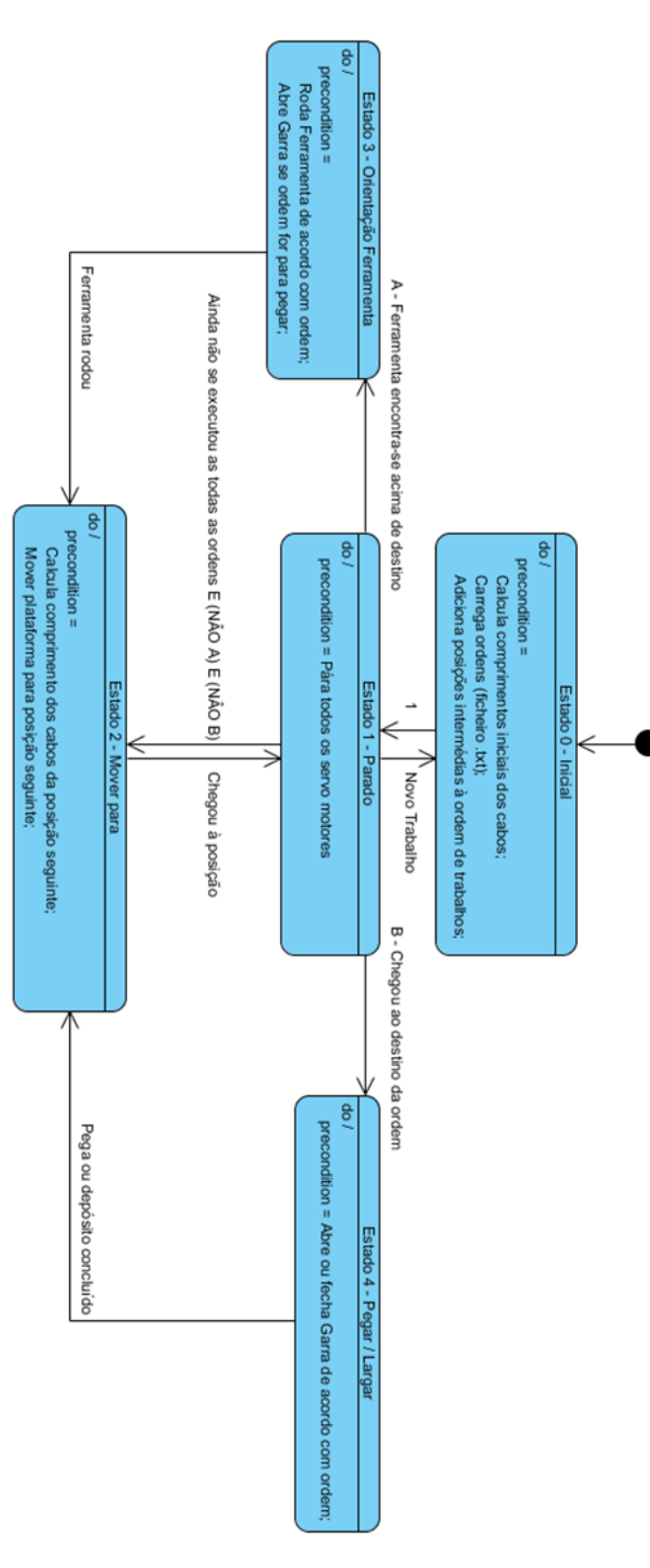


Figura 5.2 - Máquina de estados

O diagrama da máquina de estados finitos é constituído por cinco estados.

O Estado 0 (inicial) é acionado quando um Trabalho é ordenado ao sistema. Aqui são calculadas todas as variáveis iniciais do sistema, ou seja, os comprimentos dos cabos quando a plataforma está na posição Origem ($X=0$, $Y=0$ e $Z=4,5$).

Depois de executadas as atividades do Estado 0, a máquina de estados evolui diretamente para o Estado 1 (parado). Aqui é ordenado que todos os servo motores tomem a velocidade zero (parados). O Estado 1 é o estado principal, do qual a máquina de estados pode transitar para todos os outros estados. Quando o sistema se encontra neste Estado, podem ocorrer os quatro eventos seguintes que definem a evolução entre estados:

1. O Utilizador ordena um novo Trabalho - máquina de estados transita para o Estado Inicial;
2. Sistema verifica se já executou as ordens todas:
 - Se sim ($i = n$), mantém-se no Estado 1 em espera de um novo Trabalho;
 - Se não ($i < n$), transita para o Estado 2 (Mover para) se as condições 3 e 4 não se verificarem;
3. Sistema verifica se a plataforma e ferramenta se encontram na posição diretamente por cima do ponto desejado (confere se $i-1$ é múltiplo do número 3) - transita para o Estado 3 (Orientação da plataforma);
4. Sistema verifica se a plataforma e ferramenta se encontram no ponto definido pelo Utilizador (confere se i é múltiplo do número 3) - transita para o Estado 4 (Pegar / Largar);

No Estado 3 é efetuada a rotação da ferramenta e abre a garra se a ordem do Utilizador for para pegar no objeto. A transição para o Estado 2 é realizada após concluir as atividades.

No Estado 4 é executada a abertura ou fecho da garra de acordo com a ordem do Utilizador. A transição para o Estado 2 é realizada após a pega ou depósito do objeto.

5.2.2 - Controlo dos motores

Para o controlo de velocidade dos quatro servo motores é usado um controlador PD. Um controlador proporcional-derivativo (controlador PD) é um mecanismo de controlo em malha fechada amplamente utilizado em sistemas de controlo industrial. Um controlador PD calcula um valor de erro, como a diferença entre uma variável de processo de medição e um ponto desejado. O controlador minimiza o erro através do ajuste do processo de manipulação da sua saída.

O algoritmo de controlo PD usado envolve dois parâmetros: proporcional (P) e os valores derivados (D). Os valores podem ser interpretados em termos de tempo: P depende do erro presente e D é uma previsão de erros futuros com base na taxa atual de mudança. A saída é a soma ponderada destas duas partes.

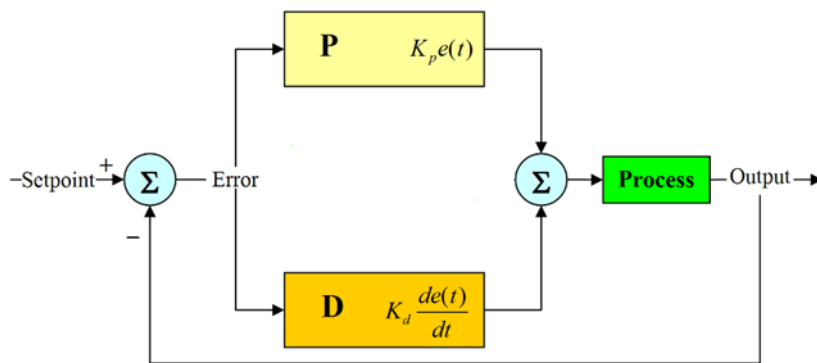


Figura 5.3 - Diagrama Controlador PD

O erro é igual à diferença entre o comprimento do cabo correspondente à posição de destino, e o comprimento do cabo no momento presente. O controlador PD contém constantes multiplicativas proporcional (K_p) e derivativa (K_d) de 10 e 5, respetivamente, determinadas experimentalmente.

Cada um dos quatro servo motores são controlados por um controlador PD individual.

Os controladores PD são integrados no *Software*. O código conceptual seguinte ajuda a perceber a implementação dos controladores implementados:

```

">> Kp := 10;
>> Kd := 5;
>> erro1 := Comp_pos1 - Comp1 ;
>> erro2 := Comp_pos2 - Comp2 ;
>> erro3 := Comp_pos3 - Comp3 ;
>> erro4 := Comp_pos4 - Comp4 ;
>> Vel1 := Kp * erro1 + Kd*( erro1 - erro_ant1) ;
>> Vel2 := Kp * erro2 + Kd*( erro2 - erro_ant2) ;
>> Vel3 := Kp * erro3 + Kd*( erro3 - erro_ant3) ;
>> Vel4 := Kp * erro4 + Kd*( erro4 - erro_ant4) ;
>> erro1_ant:=erro1;
>> erro2_ant:=erro2;
>> erro3_ant:=erro3;
>> erro4_ant:=erro4;"

```

Erro correspondente a cada cabo - $erro_i$, $i = 1, \dots, 4$;

Erro anterior correspondente a cada cabo - $erro_ant_i$, $i = 1, \dots, 4$;

Comprimento presente de cada cabo - $Comp_i$, $i = 1, \dots, 4$;

Comprimento pretendido de cada cabo - $Comp_pos_i$, $i = 1, \dots, 4$;

Velocidade de cada motor - Vel_i , $i = 1, \dots, 4$;

Estas 14 linhas de código conceptual estão inseridas dentro de um ciclo que é executado a cada 100 milissegundos.

5.3 - Interface

Para o desenvolvimento deste robô foram precisos conhecimentos das mais variadas áreas: mecânica de cabos e suas propriedades, matemática, geometria, cinemática de robôs, entre outros. O futuro utilizador deste robô não precisa de dominar nenhuma destas áreas, sendo apenas necessário conhecer a ordem de trabalhos desejada.

5.2.1 - Reiniciação

Antes de mais, é necessário que o utilizador tenha em atenção e noção que o robô, antes de começar a executar qualquer trabalho, precisa de ser iniciado. O passo seguinte é evitável se, e só se, antes de qualquer pedido de novo Trabalho, a plataforma se encontre na posição “Origem”. Esta posição no espaço corresponde a $X=0$, $Y=0$ e $Z=4,5$ centímetros com a plataforma paralela em relação ao plano XY, isto é, com inclinações de valor nulo. Se antes do trabalho a executar, o robô não se encontrar na posição Origem, é necessário fazer-se uma reiniciação. Para isso basta fixar a plataforma na posição Origem com as duas peças apropriadas para o efeito. Depois basta pressionar no ícone “Reset” da aplicação e esperar que este deixe de estar selecionado (o processo é feito automaticamente). Nesta circunstância o sistema enrola os cabos (servo motores com binário limitado) até que todos os cabos estejam esticados com tensões iguais. As Figuras 5.4 e 5.5 representam este processo.

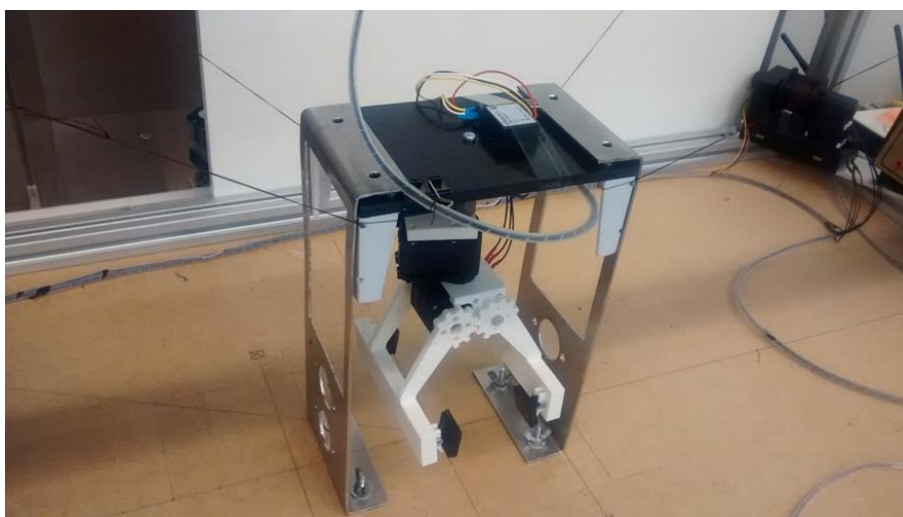


Figura 5.4 - Posição de reiniciação do sistema



Figura 5.5 - Reset

5.2.2 - Uso do sistema

Como é sabido o robô tem a capacidade de fazer deslocar a sua plataforma móvel dentro do seu volume de trabalho. A plataforma móvel pode conter uma ferramenta, neste caso está instalada uma garra que permite pegar e rodar (em relação ao plano XY, ou seja, ângulo Yaw) objetos de pequena escala. De acordo com as limitações do robô, basta o utilizador definir a ordem de trabalhos que pretende. Para isso é criado um ficheiro de texto, no formato “.txt”, onde indica em cada linha a posição no espaço para onde quer deslocar a ferramenta através das coordenadas, se pretende que a garra abra ou feche na posição destino e a rotação da ferramenta. Cada parâmetro de uma ordem é separado pelo carácter “/” e cada ordem corresponde a uma linha no texto do ficheiro.

Parâmetros do ficheiro de texto:

1. Coordenada X da posição destino dessa ordem. A informação aqui introduzida terá de ser um número (inteiro ou decimal). Valores desta variável são condicionados pelos limites do volume de trabalho;
2. Coordenada Y da posição destino dessa ordem. A informação aqui introduzida terá de ser um número (inteiro ou decimal). Valores desta variável são condicionados pelos limites do volume de trabalho;
3. Coordenada Z da posição destino dessa ordem. A informação aqui introduzida terá de ser um número (inteiro ou decimal). Esse número não pode exceder a gama: $0 \leq Z \leq 24$ centímetros;
4. Informação que indica se o utilizador pretende que a Garra abra ou feche na posição destino dessa ordem. Corresponde a um carácter, a letra “A” para aberta ou a letra “F” para fechada;
5. Rotação da ferramenta nessa posição destino dessa ordem. A informação aqui introduzida terá de ser um número inteiro. Esse número não pode exceder a gama: $-150 \leq \theta \leq 150^\circ$;

A Figura 5.6 ilustra um exemplo de um ficheiro de texto com cinco ordens.

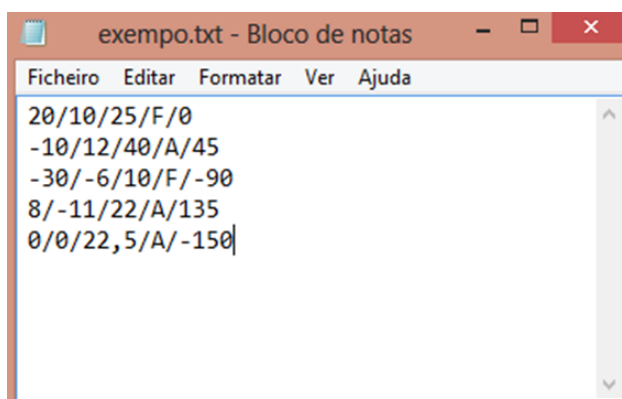


Figura 5.6 - Ficheiro de texto com cinco ordens

Cada ficheiro de texto criado nestas condições corresponde a um “Trabalho” a ser executado pelo sistema. A interface com o utilizador é feita através de um *software* com ambiente gráfico GUI. Esse *software* é um programa executável (extensão “.exe”). O ambiente gráfico foi feito para facilitar e tornar prática a utilização do robô através do computador. O programa permite que sejam introduzidos novos Trabalhos e que sejam monitorizadas variáveis do sistema. O ambiente gráfico está ilustrado na Figura 5.7.

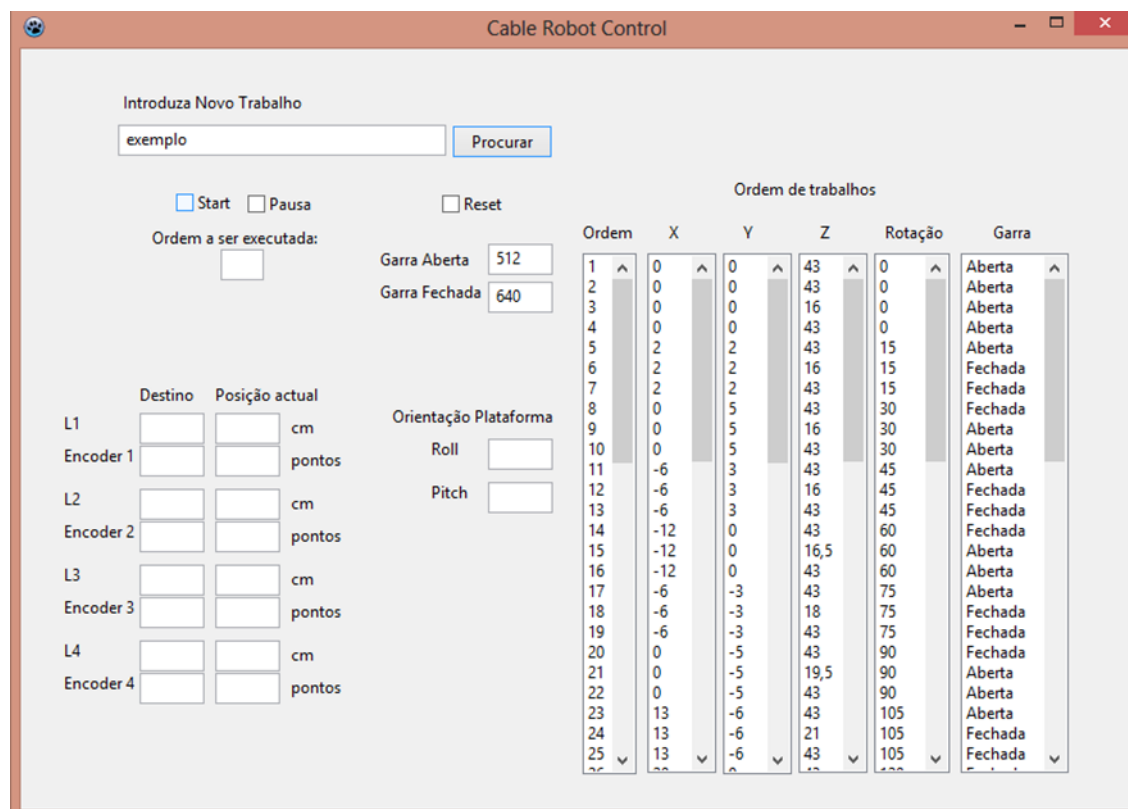


Figura 5.7 - Interface

Para introduzir um novo Trabalho basta pressionar o botão “Procurar”. Abrirá uma janela que permite seleccionar um item num qualquer diretório do PC. O único tipo de ficheiro que pode ser seleccionado é do tipo de texto (“.txt”). Após seleção do item são carregadas as ordens para o sistema. Resta agora seleccionar o ícone “Start” e o sistema executará as ordens sequencialmente.

As caixas de texto editáveis “Garra Aberta” e “Garra Fechada” permitem definir a amplitude das duas posições da garra, aberta e fechada.

Para além destas possibilidades de controlo é possível monitorar algumas constantes e variáveis do sistema. A GUI fornece *feedback*, em tempo real, dos comprimentos atuais dos cabos e a ordem que está a ser executada no momento.

Capítulo 6

Resultados

Como o principal objetivo prático do trabalho foi atingido, isto é, a capacidade de *pick-and-place* de objetos, naturalmente surge a necessidade de analisar os resultados que o sistema apresenta. Neste capítulo são descritos os estudos das capacidades reais do sistema, como a precisão e repetibilidade.

6.1 - Erro

Os resultados foram surgindo conforme se foram superados certos problemas. Alguns desses problemas não foram ponderados à partida, o que levou à deterioração dos resultados finais.

Os requisitos iniciais do sistema objetivavam a construção e controlo de um robô de cabos para a área da construção. Está implícito que o controlo de posição no espaço é o objetivo base, portanto o erro é um fator determinante para a análise de resultados. O erro corresponde à diferença entre o que se pretende e o que realmente se obtém. Neste caso pretende-se que o robô provoque a deslocação da sua plataforma para uma posição (dentro do seu volume de trabalho).

Para determinar o erro mínimo, médio e máximo de posição do sistema fez-se um estudo com uma amostra de 20 pontos. A Tabela 6.1 representa este estudo e as unidades são em centímetros.

Tabela 6.1 - Medições erro

	Ordens			Medições		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0	0	3,4	0	-0,5	3,8
2	2	2	3,4	2	1,5	3,8
3	0	5	3,4	0,1	4,4	3,6
4	-6	3	3,4	-5,6	2,3	3,7
5	-12	0	3,9	-11,1	-0,8	4
6	-6	-3	5,4	-5,7	-3,1	5,2
7	0	-5	6,9	0	-4,9	6,7
8	13	-6	8,4	13,2	-5,7	8,3
9	20	0	10,9	19,9	-0,3	10,9
10	14	7	12,4	14	6,3	12,4
11	0	10	13,9	0	9	12,7
12	-8	4	15,4	-7,7	2,5	14,8
13	-16	8	16,9	-15,3	6,9	16,7
14	-25	0	18,4	-23,9	-0,8	17,6
15	-9	-5	19,9	-8,8	-6	19,3
16	-28	-10	21,4	-27,1	-11,4	20,4
17	0	-15	22,9	-1	-13,9	21,8
18	12	-4	24,4	11,3	-4,7	23,7
19	24	-11	25,9	23,7	-10,9	24,6
20	35	0	27,4	33,8	-0,8	26

A Tabela 6.2 apresenta os valores dos erros da Tabela 6.1 e as unidades são em centímetros.

Tabela 6.2 - Erro Absoluto

	Erro Absoluto			Erro Norma Euclidiana	
	X	Y	Z	(X, Y, Z)	
	0,00	0,50	0,40	0,64	
	0,00	0,50	0,40	0,64	
	0,10	0,60	0,20	0,64	
	0,40	0,70	0,30	0,86	
	0,90	0,80	0,10	1,21	
	0,30	0,10	0,20	0,37	
	0,00	0,10	0,20	0,22	
	0,20	0,30	0,10	0,37	
	0,10	0,30	0,00	0,32	
	0,00	0,70	0,00	0,70	
	0,00	1,00	1,20	1,56	
	0,30	1,50	0,60	1,64	
	0,70	1,10	0,20	1,32	
	1,10	0,80	0,80	1,58	
	0,20	1,00	0,60	1,18	
	0,90	1,40	1,00	1,94	
	1,00	1,10	1,10	1,85	
	0,70	0,70	0,70	1,21	
	0,30	0,10	1,30	1,34	
	1,20	0,80	1,40	2,01	
	Média	0,42	0,71	0,54	1,08
	Mínimo	0,00	0,10	0,00	0,22
Máximo	1,20	1,50	1,40	2,01	

De acordo com o volume de trabalho determinado na Secção 4.3, a forma do sólido contém superfícies cujas funções não são lineares. Naturalmente o erro do sistema será mais significativo junto dos limites do volume de trabalho. Fazendo uma aproximação do sólido do volume de trabalho com a construção de um trapézio de volume inferior onde são garantidas as melhores condições de trabalho. Este trapézio tem duas faces principais (bases), uma de 64 centímetros de comprimento e 21 centímetros de largura, e outra de 89 centímetros de comprimento e 31 centímetros de largura. Para melhor percepção destas medidas ver Secção 4.3. O trapézio de aproximação do volume de trabalho está representado na Figura 6.1.

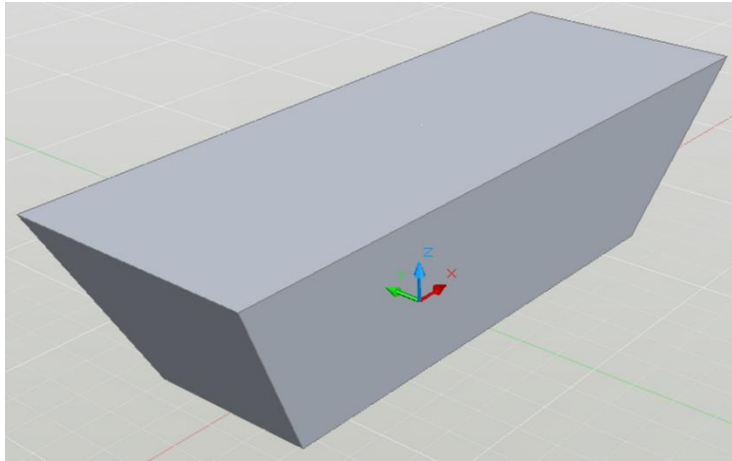


Figura 6.1 - Volume de trabalho simplificado

Usando a ferramenta AutoCAD 3D da AutoDesk é possível calcular o volume e o centróide de sólidos com qualquer geometria. Analisando o trapézio da Figura 6.2: Base 1 ($Z = 0$): $X = 64$, $Y = 21$ centímetros; Base 2 ($Z = 23$): $X = 89$, $Y = 31$ centímetros; Volume: 46226,17 centímetros cúbicos; Centróide: $X = 0$, $Y = 0$, $Z = 12,85$ centímetros.

A maior precisão de deslocação da plataforma é garantida se essa movimentação for realizada dentro dos limites do volume do trapézio da Figura 6.1.

6.2 - Repetibilidade

O sistema robótico foi analisado do ponto de vista de repetibilidade, ou seja, adquirir o conhecimento da evolução do erro de posição em relação ao tempo. Para isso foi realizado um estudo que consiste em ordenar ao robô para deslocar-se, sequencialmente, entre cinco pontos específicos (um dos quais a origem, isto é, $(x, y, z) = (0, 0, 0)$) do seu volume de trabalho. Estas quatro posições foram repetidas cinco vezes e em cada ponto, em cada momento foi medido o erro produzido. Os cinco pontos são listados na Tabela 6.3. Medições e erros em relação às posições da Tabela 6.3 estão listados na Tabela 6.4. As unidades das tabelas seguintes são em centímetros.

Tabela 6.3 - Pontos usados no teste de Repetibilidade

X	Y	Z
14	7	2,5
-16	8	7,5
-9	-5	10
24	-11	16
0	0	0

Tabela 6.4 - Medições do teste Repetibilidade

Iteração	Medição			Erro Absoluto			Média Erro Absoluto
	X	Y	Z	X	Y	Z	
0	0,40	-0,50	-0,40	0,40	0,50	0,40	0,43
1	14,50	6,50	2,30	0,50	0,50	0,20	0,66
	-15,00	8,40	6,90	1,00	0,40	0,60	
	-8,00	-5,00	8,60	1,00	0,00	1,40	
	25,10	-10,60	14,20	1,10	0,40	1,80	
	0,30	-0,50	-0,20	0,30	0,50	0,20	
2	14,40	6,30	2,60	0,40	0,70	0,10	0,71
	-14,90	8,20	6,20	1,10	0,20	1,30	
	-8,10	-5,00	8,60	0,90	0,00	1,40	
	25,00	-10,60	13,90	1,00	0,40	2,10	
	0,30	-0,40	-0,30	0,30	0,40	0,30	
3	14,40	6,50	2,10	0,40	0,50	0,40	0,71
	-14,90	8,40	6,40	1,10	0,40	1,10	
	-8,10	-5,20	8,60	0,90	0,20	1,40	
	25,00	-10,60	14,00	1,00	0,40	2,00	
	-0,30	-0,40	-0,10	0,30	0,40	0,10	
4	14,30	6,40	2,40	0,30	0,60	0,10	0,56
	-15,00	8,20	6,80	1,00	0,20	0,70	
	-8,20	-5,20	9,50	0,80	0,20	0,50	
	25,00	-10,50	14,20	1,00	0,50	1,80	
	0,20	-0,40	0,10	0,20	0,40	0,10	
5	14,20	6,30	2,80	0,20	0,70	0,30	0,55
	-14,90	8,20	6,60	1,10	0,20	0,90	
	-8,10	-5,30	9,50	0,90	0,30	0,50	
	24,70	-10,70	14,80	0,70	0,30	1,20	
	0,20	-0,50	0,30	0,20	0,50	0,30	

O gráfico da Figura 6.2 representa a evolução do erro de posição em relação à utilização, ou seja, a média do erro em cinco iterações.

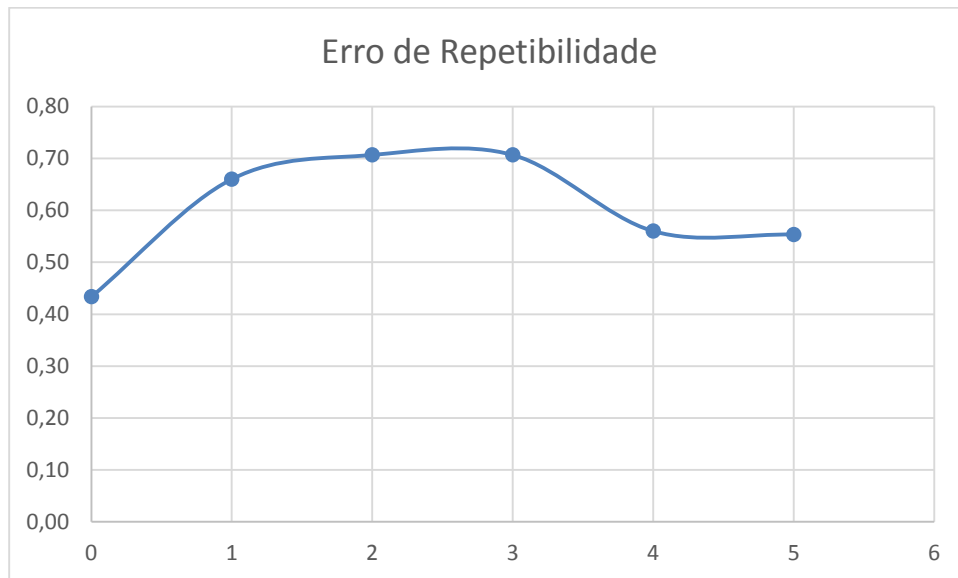


Figura 6.2 - Gráfico do erro de repetibilidade

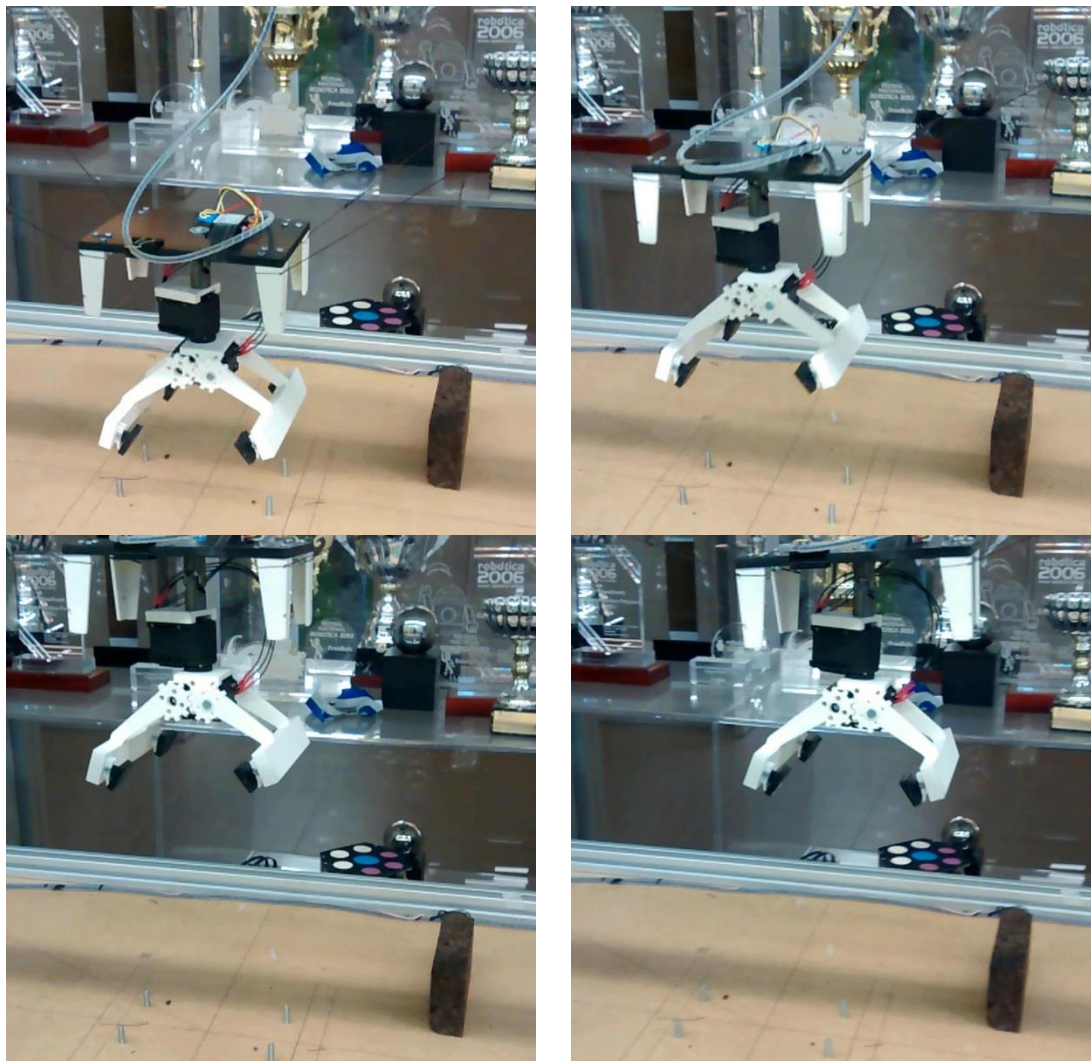
Embora a amostra do estudo seja reduzida é possível retirar algumas relações. Analisando o gráfico da Figura 6.3 é possível concluir que, para uma determinada posição, o erro mantém-se relativamente estável. Esta conclusão baseia-se na evolução do gráfico da Figura 6.2. Até à iteração 2 o erro de repetibilidade sobe, entre a iteração 2 e 3 mantém-se e depois inverte para descida da iteração 3 para 5. A tendência do gráfico mostra que, a curto prazo, o erro de repetibilidade não evolui a ponto de serem considerados valores significativos.

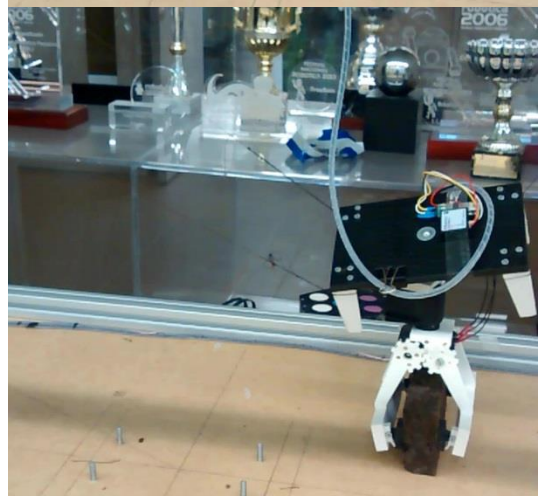
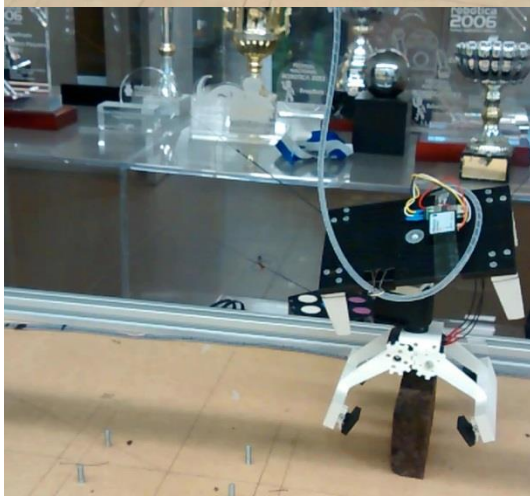
6.3 - *Pick-and-Place*

A área alvo deste projeto é a construção. Como é sabido a construção exige muito trabalho de montagem, como *pick-and-place* de objetos no espaço. Naturalmente para que o robô se aproxime das exigências pretendidas, foi instalado uma ferramenta capaz de “abraçar” objetos. Essa ferramenta é uma garra e está fixa na plataforma móvel do robô. Com isto percebe-se facilmente que toda a arquitetura do robô foi desenvolvida com foco no principal objetivo.

Foram atingidos a grande maioria dos requisitos do sistema e, claro, o principal não foi deixado de parte, o *pick-and-place* de itens.

A sequência de imagens seguinte demonstra o robô a reposicionar um objeto de cortiça. Originalmente o objeto encontra-se numa posição do primeiro quadrante na altura mínima, é rodado 90° e por fim é recolocado numa posição do segundo quadrante com a mesma altura.





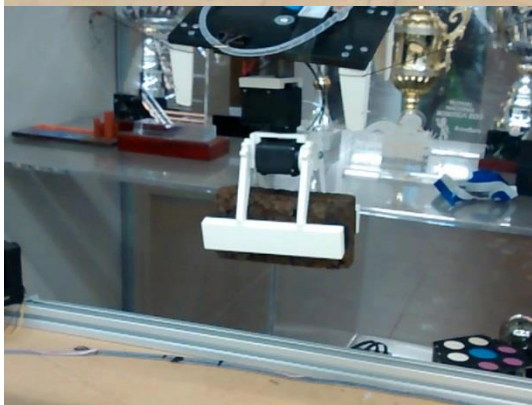
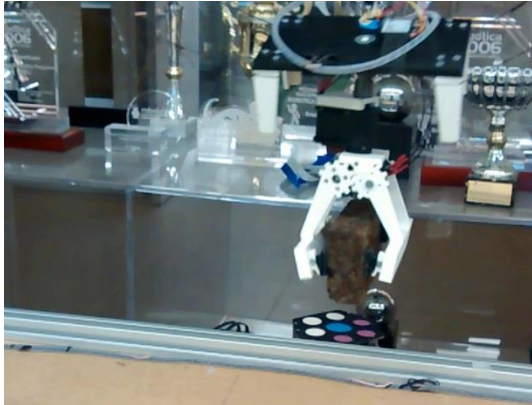




Figura 6.3 - Sequência Imagens ilustrativas de um processo pick-and-place

Os resultados obtidos demonstram que foi atingido o principal objetivo. O requisito crucial consiste no desenvolvimento de um sistema robótico por cabos, capaz de deslocar uma ferramenta no espaço. Essa ferramenta é uma garra que, juntamente com a movimentação dos cabos, permite o reposicionamento de objetos no espaço. Devido a particularidades mecânicas, o robô não permite a execução desta tarefa sem algum erro. O erro de posição foi estudado e determinou-se o valor médio de 1,08 centímetros. Analisando esta aplicação o erro mantém-se em valores aceitáveis.

Capítulo 7

Conclusões

Esta dissertação apresenta o percurso completo do desenvolvimento de um robô de cabos, especificamente o seu controlo. O projeto deste robô de cabos obedeceu aos requisitos iniciais e nunca se desviou do principal foco: criação de um sistema robótico para construção. Como já foi mencionado o *Countour Crafting* permite a construção de estruturas de grande dimensão. Manuseamento, rapidez, segurança e precisão são algumas das características mais valorizadas. Uma boa prática no desenvolvimento de projetos de Engenharia é a conceção de protótipos, muitas vezes em pequena escala, do produto final. Neste caso o principal objetivo era desenvolver um robô de cabos com uma estrutura de pequena dimensão. O projeto foi separado em diversas fases, desde o estudo da arte, até ao controlo do robô. Cada uma das etapas permitiu a aquisição de conhecimentos nas mais diversas áreas como: geometria, matemática, cinemática específica deste tipo de robôs, mecânica de cabos, programação, entre outras.

O estado da arte permitiu a aprendizagem e compreensão do problema geral e das tecnologias a abordar. Os protótipos e produtos finais estudados usam arquiteturas diferentes e, consequentemente, apresentam características diferentes.

Ponderando as características de certos robôs de cabos, a decisão da arquitetura a usar não foi somente em função dos objetivos práticos mas também nos requisitos do projeto, como a contenção de custos. Foi então optado por uma arquitetura de quatro cabos onde a única força descendente que se apresenta, em todos os momentos, na plataforma é a força gravitacional. Este tipo de robô de cabos é, à priori, adequado para a finalidade pretendida. O baixo número de cabos (quatro) permite manter os custos em níveis aceitáveis, não limitando os graus de liberdade necessários para concluir as tarefas propostas. O robô permite variar a posição e orientação da plataforma controlando os comprimentos dos quatro cabos. Devido à forma geométrica da plataforma (retangular) e da arquitetura da estrutura (paralelepípedo) um dos graus de liberdade que influencia a orientação da plataforma, o ângulo *Yaw*, é praticamente inexistente. Para contornar esta limitação foi instalada uma ferramenta (uma garra) que

adiciona ao sistema este grau de liberdade, ou seja, produz uma rotação sobre si mesma e em relação ao plano XY . Assim os seis graus de liberdade (X , Y , Z , Yaw , $Roll$ e $Pitch$) que o robô possui concedem uma grande versatilidade. A tarefa base é a de *pick-and-place* de objetos em relação ao plano XY . Os graus de liberdade $Roll$ e $Pitch$ são prescindíveis. Com foco no aumento do volume de trabalho, foi adicionado um dispositivo mecânico instalado entre a plataforma e a ferramenta. Este mecanismo é um *Cardan* e permite a independência dos ângulos $Roll$ e $Pitch$ da plataforma. Portanto a ferramenta desloca-se no espaço cartesiano juntamente com a plataforma mas a sua orientação mantém-se sempre em direção normal ao plano XY . O volume de trabalho é acrescido com a inclusão deste sistema mecânico. Assim o sistema completo apresenta quatro graus de liberdade: X , Y , Z e Yaw , os suficientes e essenciais para realizar o trabalho necessário.

O volume de trabalho deste robô possui semelhanças aos demais robôs de cabos, especialmente com aqueles que só contêm cabos acima do centro de massa da ferramenta. O volume de trabalho aumenta de baixo para cima e é sempre inferior ao volume da estrutura do robô. Devido às limitações e características de todos os componentes mecânicos deste protótipo (resistência dos materiais, elasticidade dos cabos, etc.), o volume de trabalho não é tão extenso quanto poderia ser em condições ideais. Mesmo assim obtiveram-se bons resultados em relação aos manipuladores clássicos e mesmo comparativamente com outros robôs de cabos.

O estudo do erro permitiu perceber a precisão com que o robô trabalha ao longo do volume de trabalho. Percebeu-se que o principal fator que mais prejudica o erro é a qualidade da reiniciação do sistema. Uma reiniciação do sistema em condições favoráveis permite que o erro se mantenha em valores consideravelmente baixos. O erro aumenta conforme a distância à origem do referencial, ou seja, quanto mais longe do centro do tampo inferior da estrutura mais significativo é o erro. Isto deve-se ao facto da distensão dos cabos ser proporcional à massa e posição plataforma.

O erro de repetibilidade é pouco significativo (pelo menos a curto prazo) e portanto não existe a necessidade de reiniciar o sistema com grande regularidade.

Consequentemente pode ser afirmado que todos os objetivos propostos para esta dissertação foram alcançados.

Por forma a ampliar as capacidades atuais do sistema ficam algumas sugestões para trabalho futuro. Consideração da elasticidade dos cabos para diminuição do erro; utilização de um filtro de Kalman para o auxílio do controlo e consequente previsão ou estimativa de valores associados ao sistema; uso de câmaras stereo ou *Time of light* (TOF) por forma a controlar o sistema em malha fechada.

Referências

- [1] B. Khoshnevis, Automated construction by contour crafting robotics and information technologies, Journal of Automation Construction – Special Issue: The Best of ISARC 2002 13 (1) (2004)
- [2] B. Khoshnevis, R. Russel, H. Kwon, S. Bukkapatnam, Crafting large prototypes, IEEE Robotics & Automation Magazine (2001)
- [3] Pott, A.: An algorithm for real-time forward kinematics of cable-driven parallel robots. In: 12th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Springer, Piran Portoroz and Slovenio (2010)
- [4] Pott, A., Meyer, C., Verl, A.: Large-scale assembly of solar power plants with parallel cable robots. In: Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK), pp. 1-6 (2010)
- [5] Merlet, J.P.: Kinematics of the wire-driven parallel robot marionet using linear actuators. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena and CA and USA, In (2008)
- [6] Pott, A.: Forward kinematics and workspace determination of a wire robot for industrial applications. In: ARK, pp. 451-458, Springer, Baz-sur-Mer and France (2008)
- [7] Pott, A., Bruckmann, T., Mikelsons, L.: Closed-form force distribution for parallel wire robots. In: Computational Kinematics, pp. 25-34, Springer, Duisburg and Germany (2009)
- [8] Perreault, S., Cardou, P., Gosselin, C.M., Otis, M. J-D.: Geometric determination of the interference-free constant-orientation workspace of parallel cable-driven mechanisms. ASME J. Mech. Rob. 2(3) (2010)
- [9] Pott, A.: An algorithm for real-time forward kinematics of cable-driven parallel robots. In: 12th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Springer, Piran Portoroz and Slovenio (2010)
- [10] Mechanisms and Machine Science, Vol. 12 - Cable-Driven Parallel Robots
- [11] Kawamura, S., Choe, W., Tanaka, S., Pandian, S.R.: Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya (1995)

- [12] Hiller, M., Fang, S., Mielczarek, R., Verhoeven, R., Franitza, D.: Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators. *Mech. Mach. Theory* 40(4), 429-445 (2005)
- [13] CoGiRo Project. <http://www2.lirmilimetros.fr/cogiro/> (2014)
- [14] Surdilovic, D., Jinyu, Z., Bernhardt, R.: String-man: Wire-robot technology for safe, flexible and human-friendly gait rehabilitation. In: *IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, ICORR 2007*, pp. 446-453 (2007)
- [15] N.G. Dagalakis, J. S. Albus, K. R. Goodwin, J.D. Lee, T. Tsai, H. Abrishamian, and R. V. Bostelman, *Robot Crane Tecnology Program - Final Report*, Nist Technical Note 1267, Natl. Inst. Stand. Technol., Tech. Note 1267, July 1989
- [16] *Journal of Research of the National Institute of Standards and Tecnology, The NIST RoboCrane*, Volume 97, Number 3, May-June 1992
- [17] Albus, J.S., Bostelman, R.V., Dagalakis, N.G.: The nist robocrane. *J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol.* 97(3), 373-385 (1992)
- [18] Heyden, T.: Bahnregelung eines seilgeführten Handhabungssystems mit kinematisch unbestimilímetroster Lastführung. *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 1100*. VDI Verlag, Düsseldorf (2006)
- [19] Maier, T.: Bahnsteuerung eines seilgeführten Handhabungssystems. *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 1047*. VDI Verlag, Düsseldorf (2004)
- [20] Dagalakis, N.G., Albus, J.S., Wang, B.-L., Unger, J., Lee, J.D.: Stiffness study of a parallel link robot crane for shipbuilding applications. *ASME J. Mech. Des.* 111(3), 183-193 (1989)
- [21] Verhoeven, R.: *Analysis of the Workspace of Tendon-based Stewart Platforms*. PhD thesis, University of Duisburg-Essen, Duisburg (2004)
- [22] https://www.dspace.com/shared/data/pdf/dSPACE_NEWS/dSPACENEWS2007-1_The_Robots_Net_en_500.pdf
- [23] Lafourcade, P., Zheng, Y-Q., Liu, X.: Stiffness analysis of wire-driven parallel kinematic manipulators. In: *Proceedings 11thWorld Congress on Theory of Machines and Mechanisms, Tianjin and China* (2003)
- [24] Surdilovic, D., Bernhardt, R.: String-man: a new wire robot for gait rehabilitation. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2031-2036. New Orleans (2004)
- [25] https://www.europeanrobotics12.eu/media/9753/wire-driven_parallel_robots.pdf
- [26] Bruckmann, T.: *Auslegung und Betrieb redundanter paralleler Seilroboter*. Universität Duisburg-Essen (2010)
- [27] Fang, S.: *Design, Modeling and Motion Control of Tendon-Based Parallel Manipulators*. *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 1076*. VDI Verlag, Düsseldorf (2005)
- [28] Hiller, M., Fang, S., Mielczarek, S., Verhoeven, R., Franitza, D.: Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators. *Mech. Mach. Theor.* 40(4), 429-445 (2005)

[29] Kawamura, S., Tanaka, W.S., Pandian, S.R.: Development of an ultrahigh speed robot falcon using wire drive system. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1764-1850 (1995)

[30] Lafourcade, P., Llibre, M., Reboulet, C.: Design of a parallel wire-driven manipulator for wind tunnels. In: Gosselin, C.M. Ebert-Uphoff, I. (eds.) Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, Quebec City and Canada (2002)

[31] <http://advantech.gr/med07/papers/T30-018-910.pdf>

[32] <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4058944&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4058334%2F4058335%2F04058944.pdf>

[33] http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=525288&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D525288

[34] Maeda, K., Tadokoro, S., Takamori, T., Hiller, M., Verhoeven, R.: On design of a redundant wire-driven parallel robot warp manipulator. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 895-900. Detroit and MI and USA (1999)

[35] Tadokoro, S., Verhoeven, R., Hiller, M., Takamori, T.: A portable parallel manipulator for search and rescue at large-scale urban earthquakes and an identification algorithm for the installation in unstructured environments. In: Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS 1999, Kyongju and South Korea (1999)

[36] http://www.ode.org/ode-latest-userguide.html#sec_3_5_0

[37] http://www.ipa.fraunhofer.de/IPAnema_ein_hochdynamischer_Seilroboter.839.0.html

[38] <https://www.mathworks.com/moler/leastquares.pdf>

Anexo A

Tabela A.1 - Dados I Estudo - Parte I

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,0	0,0	48,6	0,0	50,5	0,0	50,5	0,0	50,5	0,0	50,5	0,4	-0,3
6,9	0,0	48,5	193,0	56,6	-198,0	44,2	-207,0	43,9	202,0	56,9	2,2	-0,1
13,8	0,0	49,4	392,0	63,0	-400,0	37,8	-403,0	37,7	401,0	63,2	3,7	-0,5
21,0	-0,3	51,0	592,0	69,3	-596,0	31,6	-607,0	31,2	600,0	69,6	5,0	-0,2
28,4	-0,3	52,9	792,0	75,7	-794,0	25,3	-803,0	25,0	801,0	76,0	6,3	-0,5
33,9	0,0	54,1	930,0	80,1	-935,0	20,8	-935,0	20,8	935,0	80,2	7,4	-0,7

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,0	0,0	42,7	0,0	52,5	0,0	52,5	0,0	52,5	0,0	52,5	0,3	-0,7
6,9	0,4	43,0	193,0	58,6	-196,0	46,3	-206,0	46,0	204,0	59,0	3,2	0,7
14,0	0,4	43,9	395,0	65,1	-400,0	39,8	-408,0	39,5	402,0	65,3	5,9	1,0
21,2	0,0	46,0	609,0	71,9	-600,0	33,4	-609,0	33,1	603,0	71,7	8,3	1,0
28,1	0,3	48,2	798,0	77,9	-797,0	27,2	-806,0	26,9	802,0	78,0	10,5	0,7
35,5	0,5	52,0	1000,0	84,3	-997,0	20,8	-1008,0	20,5	999,0	84,2	11,7	-0,1

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,3	-0,3	37,2	0,0	54,2	0,0	54,2	0,0	54,2	0,0	54,2	0,3	-1,0
7,1	0,3	37,4	194,0	60,4	-198,0	47,9	-208,0	47,6	204,0	60,7	4,5	1,5
14,5	0,0	38,6	403,0	67,0	-400,0	41,5	-408,0	41,2	404,0	67,0	8,3	2,3
21,7	-0,4	40,5	607,0	73,5	-600,0	35,1	-608,0	34,9	604,0	73,4	11,9	2,5
28,7	0,3	42,8	803,0	79,7	-798,0	28,8	-804,0	28,7	804,0	79,7	15,3	2,2
35,8	0,5	47,2	994,0	85,8	-997,0	22,5	-1006,0	22,2	1004,0	86,1	19,0	1,8
43,1	0,3	51,7	1187,0	91,9	-1196,0	16,2	-1208,0	15,8	1184,0	91,8	22,1	0,4

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,0	0,0	32,7	0,0	56,0	0,0	56,0	0,0	56,0	0,0	56,0	0,4	-0,6
7,2	0,4	32,7	193,0	62,1	-196,0	49,8	-209,0	49,4	205,0	62,5	5,7	2,8
14,7	0,4	34,5	413,0	69,1	-396,0	43,4	-403,0	43,2	405,0	68,9	9,8	3,0

22,3	0,1	35,9	610,0	75,4	-611,0	36,6	-608,0	36,7	607,0	75,3	14,4	1,4
29,5	0,3	38,3	807,0	81,6	-810,0	30,3	-807,0	30,4	803,0	81,5	19,9	0,9
36,5	0,2	42,6	1005,0	87,9	-1006,0	24,0	-1006,0	24,0	1005,0	87,9	25,8	1,5
43,4	0,6	48,2	1194,0	93,9	-1190,0	18,2	-1207,0	17,6	1199,0	94,1	31,3	2,1

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,0	-0,1	28,4	0,0	57,8	0,0	57,8	0,0	57,8	0,0	57,8	0,3	-1,0
7,6	0,2	28,1	194,0	64,0	-201,0	51,4	-207,0	51,2	-204,0	51,3	6,1	1,7
15,3	0,0	29,7	413,0	70,9	-397,0	45,2	-409,0	44,8	-404,0	45,0	11,6	3,4
22,7	0,0	30,8	617,0	77,4	-599,0	38,8	-607,0	38,5	-604,0	38,6	17,2	3,2
30,1	0,0	34,1	810,0	83,5	-797,0	32,5	-801,0	32,3	-805,0	32,2	23,7	2,1
37,1	0,1	37,9	1018,0	90,1	-997,0	26,1	-1006,0	25,8	-1004,0	25,9	31,6	3,1
44,1	0,1	43,8	1215,0	96,4	-1194,0	19,9	-1206,0	19,5	-1202,0	19,6	41,3	2,3

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,1	-0,1	22,9	0,0	61,0	0,0	61,0	0,0	61,0	0,0	61,0	0,4	-0,9
7,7	0,2	23,0	193,0	67,1	-196,0	54,8	-209,0	54,4	206,0	67,5	7,0	0,2
15,5	-0,1	23,9	394,0	73,5	-400,0	48,3	-401,0	48,3	406,0	73,9	13,5	-1,0
23,5	0,0	25,8	596,0	79,9	-599,0	42,0	-607,0	41,7	607,0	80,3	20,8	-0,2
31,0	-0,2	28,4	796,0	86,3	-800,0	35,6	-809,0	35,3	806,0	86,6	29,2	-0,4
38,0	0,2	32,3	992,0	92,5	-997,0	29,3	-1005,0	29,1	1007,0	93,0	39,4	0,1
41,3	0,2	34,5	1096,0	95,8	-1094,0	26,2	-1101,0	26,0	1104,0	96,1	45,2	-0,3

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,2	0,0	16,2	0,0	65,3	0,0	65,3	0,0	65,3	0,0	65,3	0,7	-0,7
7,7	0,4	16,6	193,0	71,4	-198,0	59,0	-209,0	58,7	206,0	71,8	8,6	0,2
15,8	0,4	18,4	394,0	77,8	-393,0	52,8	-409,0	52,3	402,0	78,1	16,3	1,4
23,8	0,0	19,5	595,0	84,2	-599,0	46,3	-609,0	45,9	603,0	84,5	25,0	-0,4
31,6	0,0	22,5	796,0	90,6	-796,0	40,0	-806,0	39,7	806,0	90,9	34,4	0,2
38,9	0,0	25,9	995,0	96,9	-998,0	33,6	-1001,0	33,5	1006,0	97,3	45,9	-0,7

Tabela A.2 - Dados I Estudo - Parte II

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,0	0,0	47,7	0,0	50,5	0,0	50,5	0,0	50,5	0,0	50,5	-0,6	0,4
0,0	3,3	47,7	57,0	52,3	46,0	52,0	-46,0	49,0	-51,0	48,9	-0,3	4,5
0,0	6,5	47,7	106,0	53,9	97,0	53,6	-88,0	47,7	-100,0	47,3	-0,4	8,5
0,0	9,3	48,9	155,0	55,4	145,0	55,1	-155,0	45,6	-146,0	45,9	-0,2	12,5
0,1	11,8	49,2	207,0	57,1	196,0	56,7	-199,0	44,2	-192,0	44,4	-0,1	16,2

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,2	0,0	41,7	0,0	52,5	0,0	52,5	0,0	52,5	0,0	52,5	-0,4	0,8
0,2	3,2	41,7	53,0	54,2	43,0	53,9	-46,0	51,0	-52,0	50,8	0,2	7,2
0,3	6,6	42,5	107,0	55,9	97,0	55,6	-95,0	49,5	-101,0	49,3	0,8	13,8

0,3	9,6	42,9	156,0	57,5	146,0	57,1	-145,0	47,9	-151,0	47,7	1,0	20,0
0,3	12,4	43,8	198,0	58,8	196,0	58,7	-196,0	46,3	-199,0	46,2	0,5	25,9
0,4	15,0	44,6	255,0	60,6	248,0	60,4	-240,0	44,9	-239,0	44,9	1,1	33,2
0,2	17,5	45,6	294,0	61,8	293,0	61,8	-312,0	42,6	-299,0	43,0	0,8	38,8
0,0	19,5	47,0	356,0	63,8	349,0	63,6	-346,0	41,5	-339,0	41,7	1,7	47,8

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,0	0,0	36,9	0,0	54,0	0,0	54,0	0,0	54,0	0,0	54,0	-0,7	0,9
0,0	3,6	37,0	54,0	55,7	48,0	55,5	-42,0	52,7	-51,0	52,4	1,1	9,4
0,0	5,3	37,1	80,0	56,5	74,0	56,4	-72,0	51,7	-79,0	51,5	0,5	13,2
-0,1	6,9	37,7	98,0	57,1	97,0	57,1	-97,0	50,9	-104,0	50,7	0,9	17,0
-0,2	10,0	38,6	144,0	58,6	144,0	58,6	-148,0	49,3	-152,0	49,2	0,9	24,7
0,0	13,5	40,3	200,0	60,4	194,0	60,2	-204,0	47,5	-202,0	47,6	0,8	32,9
0,0	16,4	42,3	235,0	61,5	240,0	61,6	-250,0	46,1	-256,0	45,9	0,9	40,0

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,0	0,0	33,1	0,0	56,0	0,0	56,0	0,0	56,0	0,0	56,0	-0,8	0,9
-0,2	2,6	33,3	29,0	56,9	39,0	57,2	-34,0	54,9	-43,0	54,6	0,4	8,4
0,0	5,1	34,4	58,0	57,8	65,0	58,1	-96,0	52,9	-83,0	53,4	0,9	14,6
-0,2	7,1	35,0	110,0	59,5	118,0	59,7	-118,0	52,3	-123,0	52,1	1,0	20,9
-0,3	10,2	36,1	180,0	61,7	196,0	62,2	-198,0	49,7	-204,0	49,5	0,6	27,0
0,0	12,7	38,1	200,0	62,4	200,0	62,4	-200,0	49,6	-200,0	49,6	0,2	32,4
0,0	14,5	39,0	242,0	63,7	236,0	63,5	-234,0	48,6	-242,0	48,3	0,6	38,8
0,0	17,0	40,5	272,0	64,6	275,0	64,7	-273,0	47,3	-282,0	47,0	0,8	45,7

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
-0,1	0,0	29,9	0,0	57,0	0,0	57,0	0,0	57,0	0,0	57,0	-0,9	1,0
-0,1	2,8	30,6	48,0	58,5	36,0	58,1	-55,0	55,3	-45,0	55,6	-0,5	8,5
-0,1	5,0	31,3	74,0	59,4	61,0	58,9	-101,0	53,8	-85,0	54,3	-0,5	14,5
-0,3	7,4	31,8	116,0	60,7	117,0	60,7	-114,0	53,4	-121,0	53,2	0,1	21,9
-0,3	10,0	32,9	151,0	61,8	158,0	62,0	-157,0	52,0	-164,0	51,8	-0,3	29,0
-0,2	12,8	33,5	203,0	63,5	200,0	63,4	-194,0	50,8	-201,0	50,6	0,7	37,3
-0,5	15,0	35,2	238,0	64,6	238,0	64,6	-235,0	49,5	-242,0	49,3	0,2	44,9

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,0	0,0	22,7	0,0	61,0	0,0	61,0	0,0	61,0	0,0	61,0	-0,9	1,3
-0,2	2,3	22,8	31,0	62,0	37,0	62,2	-36,0	59,9	-44,0	59,6	0,0	9,4
-0,2	4,9	22,9	72,0	63,3	78,0	63,5	-78,0	58,5	-83,0	58,4	0,4	18,3
-0,3	7,3	23,3	103,0	64,3	117,0	64,7	-116,0	57,3	-122,0	57,1	0,4	25,8
-0,4	9,6	24,0	131,0	65,2	157,0	66,0	-148,0	56,3	-165,0	55,8	0,0	32,9
-0,5	12,4	24,7	172,0	66,5	195,0	67,2	-198,0	54,7	-202,0	54,6	-0,3	42,0

X	Y	Z	Enc1	L1	Enc2	L2	Enc3	L3	Enc4	L4	Roll	Pitch
0,0	0,0	16,6	0,0	64,7	0,0	64,7	0,0	64,7	0,0	64,7	-1,1	1,0

-0,1	2,0	16,5	38,0	65,9	30,0	65,7	-30,0	63,7	-33,0	63,7	0,2	9,1
-0,2	3,5	16,8	50,0	66,3	58,0	66,5	-56,0	62,9	-65,0	62,6	0,0	14,7
-0,2	5,4	17,0	79,0	67,2	85,0	67,4	-88,0	61,9	-93,0	61,7	0,3	21,7
-0,3	7,5	17,4	107,0	68,1	117,0	68,4	-120,0	60,9	-123,0	60,8	0,1	29,0
-0,3	9,2	17,7	136,0	69,0	147,0	69,4	-148,0	60,0	-155,0	59,8	0,6	35,7
-0,3	11,1	18,2	168,0	70,0	176,0	70,3	-177,0	59,1	-185,0	58,8	0,7	42,0

Tabela A.3 - Dados II Estudo - Parte I

d	X	Y	Z	Roll	Pitch
0,0	0,0	0,0	17,9	0,0	0,0
3,0	2,7	1,3	17,9	2,7	6,2
6,0	5,4	2,7	17,9	4,3	10,7
9,0	8,0	4,0	17,9	6,0	13,0
12,0	10,7	5,4	17,9	7,8	16,0
15,0	13,4	6,7	17,9	9,8	20,2
18,0	16,1	8,1	17,9	13,4	24,1
21,0	18,8	9,4	17,9	15,9	27,5
24,0	21,5	10,7	17,9	18,5	30,5
27,0	24,1	12,1	17,9	22,1	33,4
30,0	26,8	13,4	17,9	27,9	37,1
33,0	29,5	14,8	17,9	35,5	40,6

d	X	Y	Z	Roll	Pitch
0,0	0,0	0,0	28,6	0,0	0,0
3,0	2,7	1,3	28,6	1,3	5,0
6,0	5,4	2,7	28,6	2,5	8,5
9,0	8,0	4,0	28,6	4,0	11,0
12,0	10,7	5,4	28,6	4,2	13,1
15,0	13,4	6,7	28,6	5,9	16,4
18,0	16,1	8,1	28,6	8,7	20,5
21,0	18,8	9,4	28,6	11,0	23,8
24,0	21,5	10,7	28,6	11,7	26,9
27,0	24,1	12,1	28,6	14,0	30,0
30,0	26,8	13,4	28,6	18,6	33,6
33,0	29,5	14,8	28,6	25,6	38,7
36,0	32,2	16,1	28,6	29,0	42,0

d	X	Y	Z	Roll	Pitch
0,0	0,0	0,0	40,6	0,0	0,0
3,0	2,7	1,3	40,6	0,9	3,1
6,0	5,4	2,7	40,6	1,8	5,0
9,0	8,0	4,0	40,6	3,3	8,3
12,0	10,7	5,4	40,6	3,4	9,6

15,0	13,4	6,7	40,6	3,5	10,9
18,0	16,1	8,1	40,6	4,6	12,7
21,0	18,8	9,4	40,6	4,8	14,2
24,0	21,5	10,7	40,6	4,6	16,0
27,0	24,1	12,1	40,6	6,8	22,0
30,0	26,8	13,4	40,6	9,7	25,7
30,0	29,5	14,8	40,6	13,5	31,1
33,0	32,2	16,1	40,6	18,4	34,5
36,0	34,9	17,4	40,6	22,0	37,8
39,0	37,6	18,8	40,6	27,5	40,5

Tabela A.4 - Dados II Estudo - Parte II

X	Y	Z	Roll	Pitch
0,0	0,0	18,1	0,0	0,0
3,0	0,0	18,1	3,3	0,0
6,0	0,0	18,1	6,1	0,0
9,0	0,0	18,1	9,0	0,0
12,0	0,0	18,1	12,0	0,0
15,0	0,0	18,1	15,0	0,0
18,0	0,0	18,1	18,1	0,0
21,0	0,0	18,1	21,8	0,0
24,0	0,0	18,1	25,7	0,0
27,0	0,0	18,1	29,5	0,0
30,0	0,0	18,1	34,1	0,0

X	Y	Z	Roll	Pitch
0,0	0,0	29,0	0,0	0,0
3,0	0,0	29,0	2,6	0,0
6,0	0,0	29,0	4,8	0,0
9,0	0,0	29,0	6,9	0,0
12,0	0,0	29,0	9,0	0,0
15,0	0,0	29,0	11,3	0,0
18,0	0,0	29,0	13,8	0,0
21,0	0,0	29,0	16,5	0,0
24,0	0,0	29,0	19,7	0,0
27,0	0,0	29,0	23,4	0,0
30,0	0,0	29,0	27,8	0,0
33,0	0,0	29,0	32,2	0,0
36,0	0,0	29,0	37,7	0,0
39,0	0,0	29,0	44,5	0,0

X	Y	Z	Roll	Pitch
---	---	---	------	-------

0,0	0,0	40,5	0,0	0,0
3,0	0,0	40,5	1,6	0,0
6,0	0,0	40,5	2,8	0,0
9,0	0,0	40,5	4,2	0,0
12,0	0,0	40,5	5,7	0,0
15,0	0,0	40,5	7,2	0,0
18,0	0,0	40,5	9,2	0,0
21,0	0,0	40,5	11,1	0,0
24,0	0,0	40,5	13,3	0,0
27,0	0,0	40,5	15,7	0,0
30,0	0,0	40,5	18,9	0,0
33,0	0,0	40,5	22,9	0,0
36,0	0,0	40,5	27,9	0,0
39,0	0,0	40,5	33,0	0,0
42,0	0,0	40,5	40,6	0,0

X	Y	Z	Roll	Pitch
0,0	0,0	18,0	0,0	0,0
0,0	3,0	18,0	0,0	12,4
0,0	6,0	18,0	0,0	23,2
0,0	9,0	18,0	0,0	34,9
0,0	12,0	18,0	0,0	45,8

X	Y	Z	Roll	Pitch
0,0	0,0	28,7	0,0	0,0
0,0	3,0	28,7	0,0	10,6
0,0	6,0	28,7	0,0	19,6
0,0	9,0	28,7	0,0	29,2
0,0	12,0	28,7	0,0	39,4

X	Y	Z	Roll	Pitch
0,0	0,0	40,5	0,0	0,0
0,0	3,0	40,5	0,0	7,5
0,0	6,0	40,5	0,0	14,9
0,0	9,0	40,5	0,0	21,6
0,0	12,0	40,5	0,0	29,6
0,0	15,0	40,5	0,0	39,6

Anexo B

Tabela B.1 - Valores limites do volume de trabalho

Roll = 40 OU Pitch = 40				
Quadrante	Reta	X	Y	Z
1º	1	0	10,5	0
		0	12,5	11
		0	15,5	23
	2	34,44005	8,610061	0
		40,2609	10,06528	11
		48,02204	12,00558	23
	3	26,85504	13,37187	0
		31,77846	15,82339	11
		40,28255	20,05781	23
	4	12,37437	12,37437	0
		14,14214	14,14214	11
		16,97056	16,97056	23
	5	5,725323	11,44817	0
		6,530446	13,05807	11
		7,872319	15,74124	23
	6	32	0	0
		37	0	11
		44,5	0	23
2º	1	0	10,5	0
		0	12,5	11
		0	15,5	23
	2	-34,44	8,610061	0
		-40,2609	10,06528	11
		-48,022	12,00558	23
	3	-26,855	13,37187	0
		-31,7785	15,82339	11
		-40,2826	20,05781	23
	4	-12,3744	12,37437	0

		-14,1421	14,14214	11
		-16,9706	16,97056	23
		-5,72532	11,44817	0
	5	-6,53045	13,05807	11
		-7,87232	15,74124	23
		-32	0	0
	6	-37	0	11
		-44,5	0	23
3º	1	0	-10,5	0
		0	-12,5	11
		0	-15,5	23
	2	-34,44	-8,61006	0
		-40,2609	-10,0653	11
		-48,022	-12,0056	23
	3	-26,855	-13,3719	0
		-31,7785	-15,8234	11
		-40,2826	-20,0578	23
	4	-12,3744	-12,3744	0
		-14,1421	-14,1421	11
		-16,9706	-16,9706	23
	5	-5,72532	-11,4482	0
		-6,53045	-13,0581	11
		-7,87232	-15,7412	23
	6	-32	0	0
		-37	0	11
		-44,5	0	23
4º	1	0	-10,5	0
		0	-12,5	11
		0	-15,5	23
	2	34,44005	-8,61006	0
		40,2609	-10,0653	11
		48,02204	-12,0056	23
	3	26,85504	-13,3719	0
		31,77846	-15,8234	11
		40,28255	-20,0578	23
	4	12,37437	-12,3744	0
		14,14214	-14,1421	11
		16,97056	-16,9706	23
	5	5,725323	-11,4482	0
		6,530446	-13,0581	11
		7,872319	-15,7412	23
	6	32	0	0
		37	0	11
		44,5	0	23

